

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений.

Часть 1

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

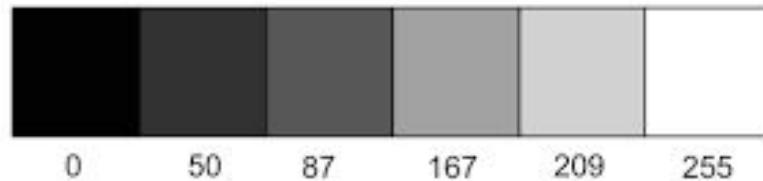
Представление изображений в компьютере

Изображения в компьютере

- Планируем классифицировать изображения
- Нужно понять с чем предстоит работать

Пиксель

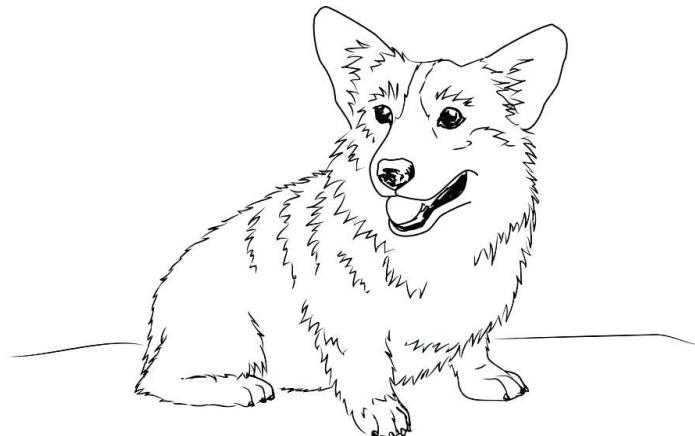
- Изображения состоят из пикселей
- Каждый описывается целым числом от 0 до 255 ($2^8=256$)



Виды изображений

- Бинарное
 - два значения интенсивностей (0 или 1, 0 или 255)
 - Нет градаций

Driven by the significance of depth,
learning better networks as easy as st
An obstacle to answering this questio
problem of vanishing/exploding grad
hamper convergence from the beginn
however, has been largely addressed b
ization [23, 9, 37, 13] and intermediate
[16], which enable networks with tens



Виды изображений

- Grayscale (градации серого)
 - Все значения интенсивностей



Виды изображений

- Цветное (RGB)
 - Все значения интенсивностей
 - Как получить цвет из чисел 0 -- 255?



Виды изображений

- Цветное (RGB)
 - Все значения интенсивностей
 - Как получить цвет из чисел 0 -- 255? Использовать **три** числа



RGB

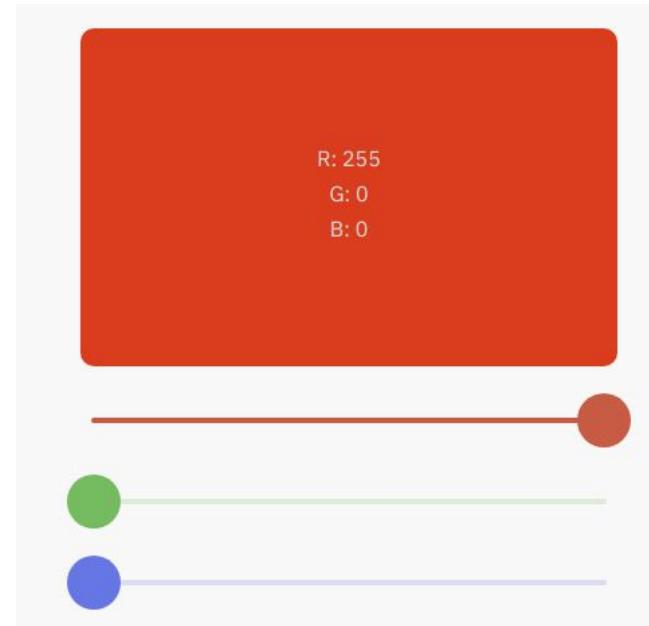
- Пиксель описывается тремя значениями
 - интенсивностью **красного** (Red)
 - **зеленого** (Green)
 - **синего** (Blue)

RGB

- Пиксель описывается тремя значениями
 - интенсивностью **красного** (Red)
 - **зеленого** (Green)
 - **синего** (Blue)
- Цвета “смешиваются” в пропорциях соответствующих интенсивностям

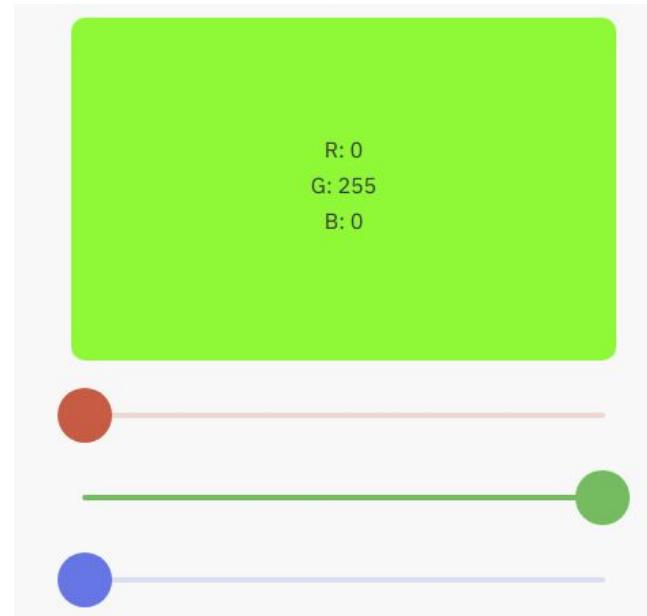
RGB

- Пиксель описывается тремя значениями
 - интенсивностью **красного** (Red)
 - **зеленого** (Green)
 - **синего** (Blue)
- Цвета “смешиваются” в пропорциях соответствующих интенсивностям



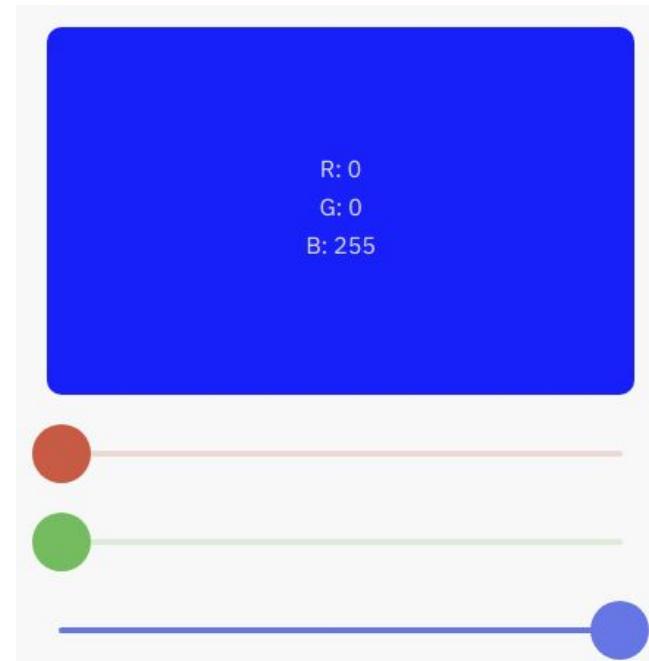
RGB

- Пиксель описывается тремя значениями
 - интенсивностью **красного** (Red)
 - **зеленого** (Green)
 - **синего** (Blue)
- Цвета “смешиваются” в пропорциях соответствующих интенсивностям



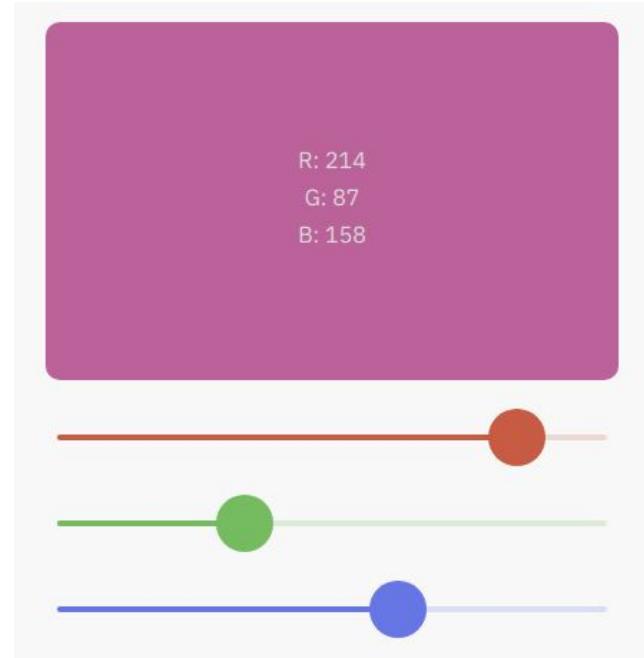
RGB

- Пиксель описывается тремя значениями
 - интенсивностью **красного** (Red)
 - **зеленого** (Green)
 - **синего** (Blue)
- Цвета “смешиваются” в пропорциях соответствующих интенсивностям



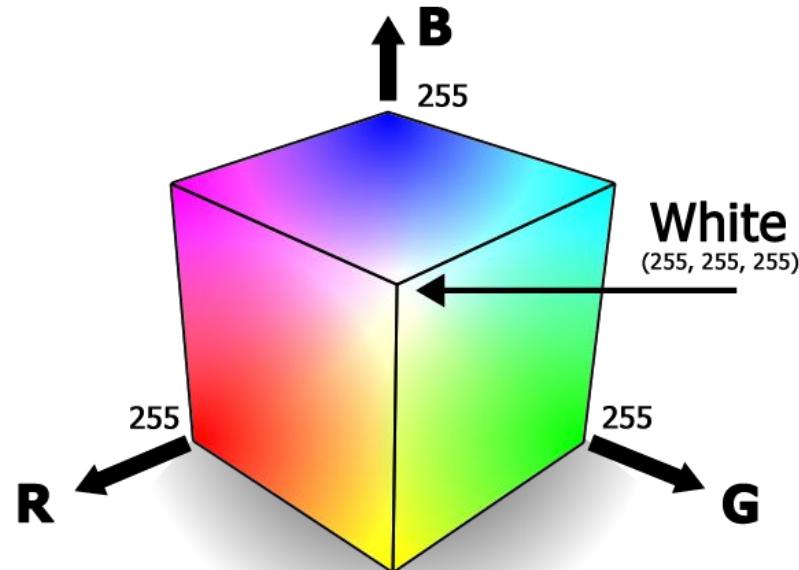
RGB

- Пиксель описывается тремя значениями
 - интенсивностью **красного** (Red)
 - **зеленого** (Green)
 - **синего** (Blue)
- Цвета “смешиваются” в пропорциях соответствующих интенсивностям



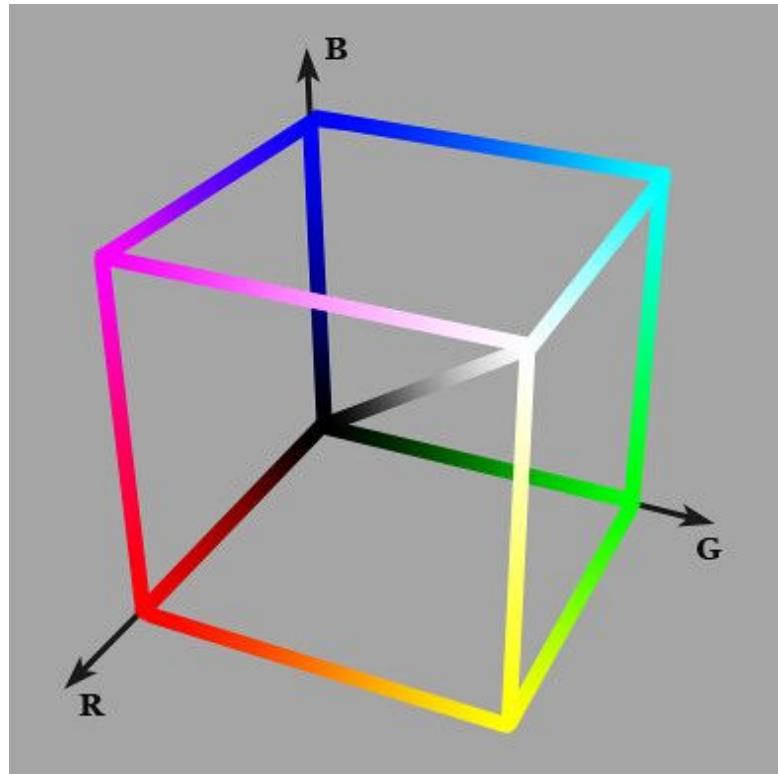
RGB куб

- Цвет -- точка с тремя координатами



RGB куб

- Цвет -- точка с тремя координатами
- Интересна диагональ где все три координаты равны
- $(0,0,0)$ -- черный
- $(255,255,255)$ -- белый
- Между -- градации серого

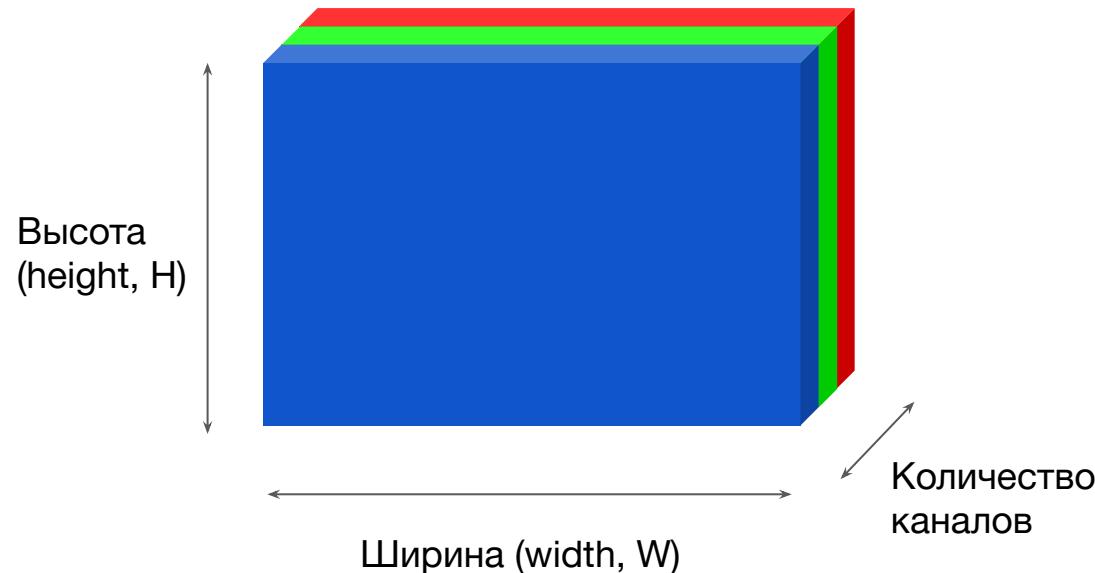


Изображение в компьютере

- Демо: <https://csfieldguide.org.nz/en/interactives/pixel-viewer/>

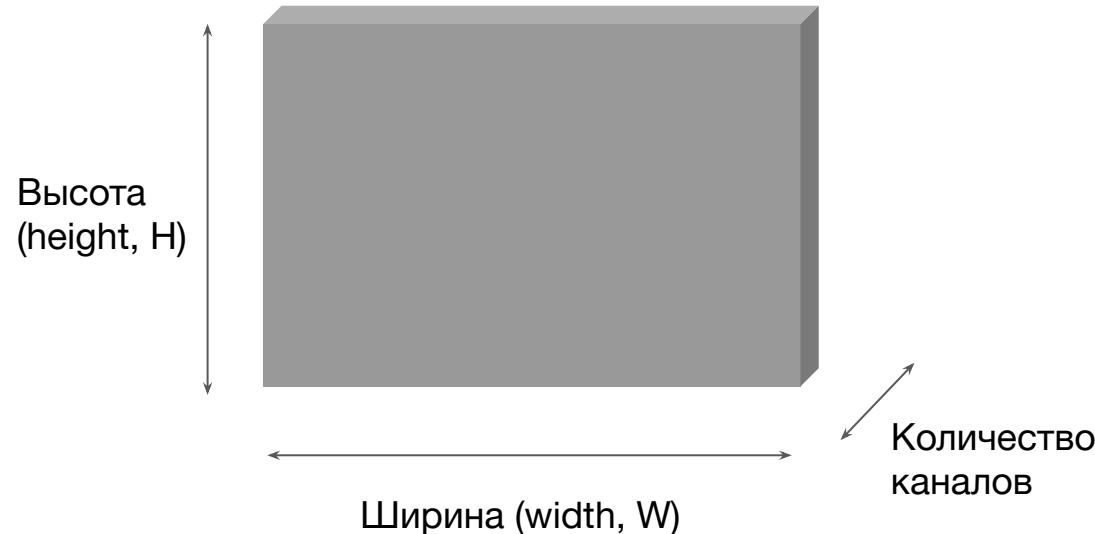
Изображение в компьютере

- Изображение -- трехмерный массив (тензор)
 - $W \times H \times 3$ - где W -- ширина, H -- высота, а 3 -- количество цветовых каналов



Изображение в компьютере

- Изображение -- трехмерный массив (тензор)
 - $W \times H \times 3$ - где W -- ширина, H -- высота, а 3 -- количество цветовых каналов
 - Или $W \times H \times 1$ -- для grayscale



Изображение в компьютере

- Несколько изображений -- четырехмерный массив (тензор)
 - Мы привыкли: если объект описывается вектором, то несколько объектов -- матрицей (количество объектов на количество признаком)
 - Т.е. Добавили измерение
 - Одна картинка -- трехмерная. Значит несколько картинок “друг за другом” -- четырехмерные
 - Количество $\times W \times H \times 3$

Итог

- Узнали как изображение представлено в компьютере
- Понимаем, что числа имеют смысл -- цвет
- Можем перейти к классификации!

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Классификация изображений

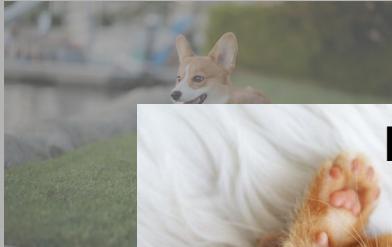
Классификация изображений



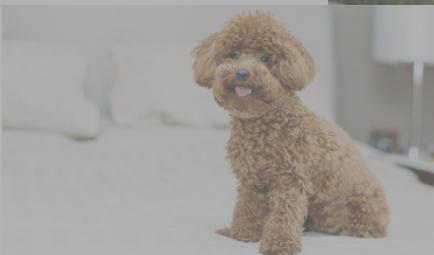
Классификация изображений



Классификация изображений



Классификация изображений

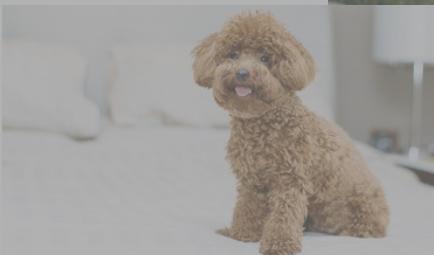


Признак 1: мордочка как у кошки

Признак 2: лапки как у кошки

Признак 3: глаза как у кошки

Классификация изображений



Признак 1: мордочка как у кошки



Признак 2: лапки как у кошки



Признак 3: глаза как у кошки



Классификация изображений



Любой классификатор

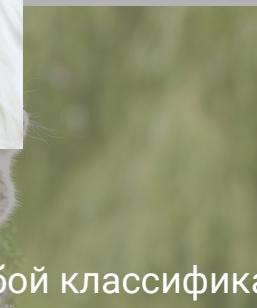
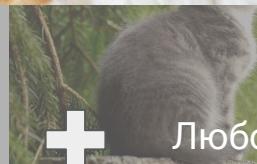
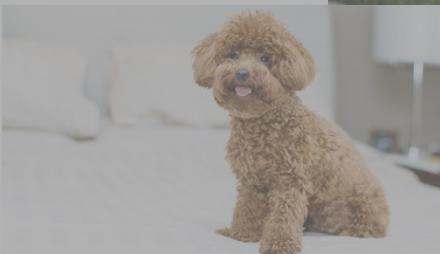
Признак 1: мордочка как у кошки

Признак 2: лапки как у кошки

Признак 3: глаза как у кошки



Классификация изображений



Признак 1: мордочка как у кошки



Признак 2: лапки как у кошки



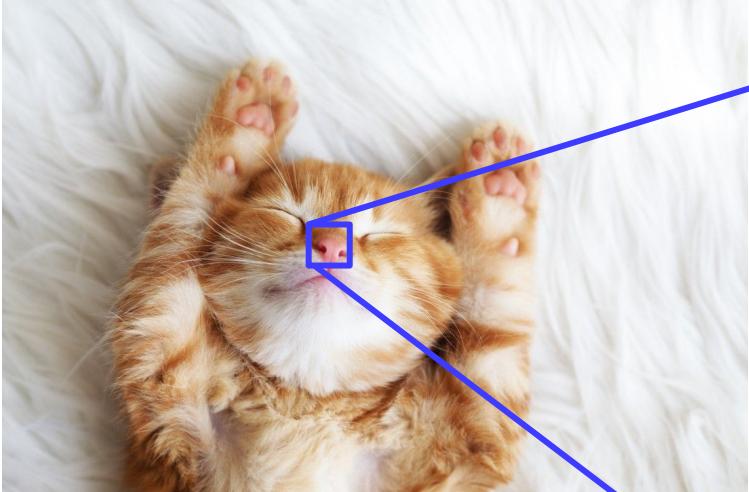
Признак 3: глаза как у кошки



Любой классификатор

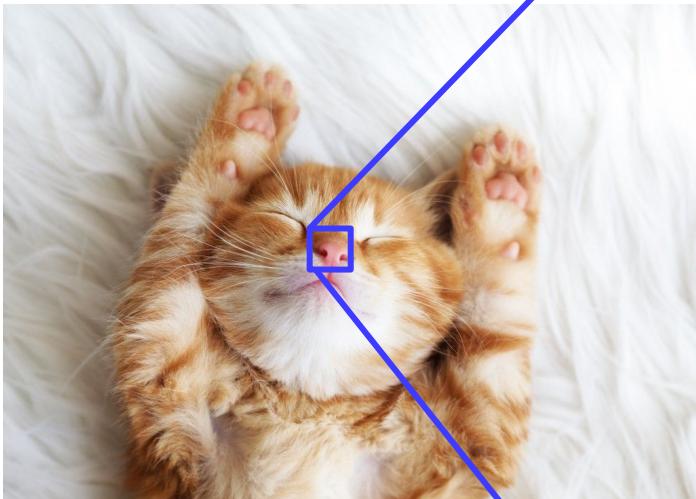
Не так просто ...

Признаки для изображений



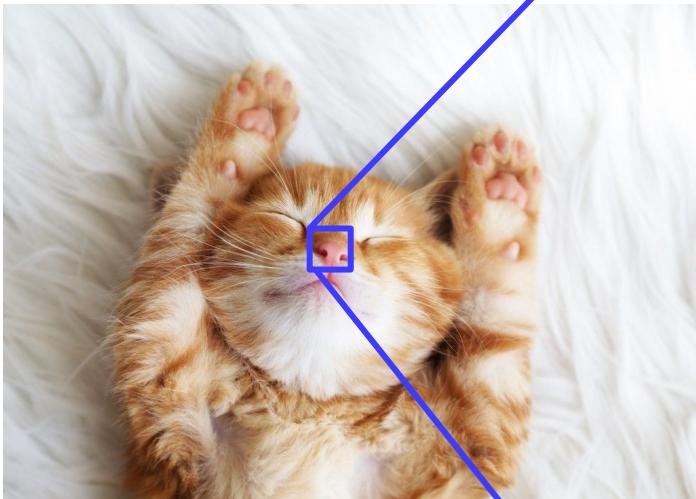
87 G 79	G 61	G 67	G 70	G 57	G 122	G 141	G 145	G 155	G 160	G 166	G 171	G 170	G 152	G 109
43 B 40	B 33	B 45	B 53	B 85	B 118	B 131	B 125	B 133	B 138	B 136	B 118	B 115	B 98	B 65
163 R 162	R 132	R 108	R 134	R 180	R 207	R 224	R 228	R 227	R 232	R 233	R 234	R 225	R 220	R 184
113 G 111	G 75	G 48	G 56	G 93	G 136	G 159	G 156	G 160	G 173	G 186	G 179	G 173	G 169	G 117
72 B 76	B 49	B 35	B 48	B 84	B 138	B 164	B 153	B 146	B 163	B 175	B 152	B 120	B 113	B 67
184 R 189	R 169	R 125	R 112	R 128	R 180	R 225	R 232	R 234	R 235	R 237	R 227	R 229	R 226	R 211
157 G 166	G 136	G 73	G 37	G 26	G 97	G 165	G 167	183 G 188	G 193	G 189	G 179	G 179	G 179	G 155
126 B 147	B 121	B 62	B 31	B 22	B 98	B 174	B 171	181 B 189	B 193	B 178	B 140	B 129	B 99	
98 R 201	R 194	R 184	R 156	R 140	R 189	R 226	R 223	R 224	R 207	R 216	R 212	R 225	R 229	R 22
81 G 191	G 180	G 148	G 89	G 47	G 103	G 158	G 169	191 G 109	G 141	G 164	G 176	G 186	G 174	
73 B 186	B 173	B 139	B 84	B 43	B 107	B 168	B 179	200 B 117	B 140	B 149	B 156	B 140	B 111	
185 R 197	R 205	R 206	R 198	R 193	R 217	R 224	R 222	R 230	R 189	R 193	R 201	R 214	R 231	R 237
165 G 185	G 161	G 58	G 57	G 105	G 129	G 147	G 162	G 186	G 91	G 117	G 138	G 174	G 105	G 191
161 B 185	B 190	B 182	B 153	B 100	B 133	B 160	B 168	190 B 102	B 126	B 133	B 154	B 175	B 15	
99 R 200	R 206	R 211	R 218	R 208	R 215	R 222	R 228	R 232	R 225	R 227	R 221	R 231	R 236	R 23
89 G 188	G 193	G 192	G 187	G 145	G 130	G 139	G 150	179 G 171	G 184	G 193	G 215	G 186	G 215	G 21
88 B 190	B 194	B 192	B 181	B 150	B 144	B 153	B 162	190 B 179	B 184	B 183	B 207	B 211	B 16	
194 R 197	R 199	R 202	R 206	R 213	R 220	R 220	R 227	230 R 228	R 233	R 230	R 235	R 237	R 239	
79 G 175	G 177	G 174	G 175	G 162	G 157	G 129	G 154	184 G 195	G 213	G 221	G 226	G 236	G 224	
79 B 183	B 183	B 179	B 177	B 171	B 175	B 145	B 169	199 B 194	B 211	B 218	B 225	B 233	B 208	
185 R 182	R 193	R 201	R 206	R 215	R 223	R 222	R 215	R 221	R 222	R 226	R 232	R 232	R 233	R 239
162 G 155	G 166	G 173	G 168	G 171	G 156	G 114	G 170	176 G 187	G 202	G 218	G 228	G 229	G 235	G 235
170 B 164	B 177	B 187	B 184	B 182	B 187	B 127	B 181	186 B 204	B 218	B 225	B 226	B 232	B 232	
181 R 191	R 198	R 204	R 207	R 216	R 215	R 207	R 220	220 R 221	R 226	R 233	R 237	R 237	R 234	
156 G 163	G 170	G 175	G 172	G 168	G 137	G 109	G 166	183 G 186	G 212	G 226	G 233	G 235	G 222	
165 B 177	B 185	B 191	B 186	B 184	B 155	B 119	B 183	200 B 207	B 216	B 226	B 232	B 231	B 227	
187 R 194	R 201	R 205	R 204	R 206	R 201	R 201	R 210	217 R 221	R 221	R 229	R 234	R 239	R 242	
165 G 166	G 174	G 174	G 154	G 128	G 92	G 109	G 156	179 G 195	G 205	G 212	G 230	G 238	G 234	
180 B 181	B 191	B 192	B 171	B 151	B 108	B 118	B 173	197 B 209	B 211	B 218	B 231	B 235	B 232	
182 R 180	R 184	R 182	R 188	R 198	R 198	R 201	R 202	211 R 220	R 220	R 229	R 229	R 231	R 234	
150 G 144	G 133	G 112	G 102	G 105	G 104	G 102	G 123	161 G 189	G 104	G 216	G 219	G 226	G 231	
165 B 158	B 149	B 132	B 121	B 127	B 128	B 118	B 140	178 B 207	R 14	B 225	B 227	B 230	B 232	
164 R 166	R 180	R 189	R 196	R 210	R 216	R 218	R 210	208 R 216	R 225	R 230	R 229	R 232	R 233	
119 G 120	G 127	G 135	G 142	G 155	G 158	G 67	G 143	141 G 181	G 83	G 209	G 216	G 219	G 225	G 221
133 B 131	B 140	B 149	B 156	B 171	B 190	B 188	B 164	157 B 198	R 71	B 228	B 227	B 230	B 23	
164 R 186	R 192	R 202	R 203	R 216	R 224	R 221	R 223	218 R 212	R 221	R 225	R 228	R 231	R 233	

Признаки для изо...



R 162	R 132	R 108	R 134	R 180	R 207	R 224	R 228	R 227	R 232	R 232	R 231
G 111	G 75	G 48	G 56	G 93	G 136	G 159	G 156	G 160	G 173	G 186	G 179
B 76	B 49	B 35	B 48	B 84	B 138	B 164	B 153	B 146	B 163	B 175	B 152
R 189	R 169	R 125	R 112	R 128	R 180	R 225	R 232	R 234	R 235	R 233	R 227
G 166	G 136	G 71	G 37	G 26	G 97	G 165	G 167	G 183	G 188	G 195	G 189
B 147	B 121	B 62	B 31	B 22	B 98	B 174	B 171	B 181	B 189	B 195	B 178
R 201	R 194	R 184	R 156	R 140	R 189	R 226	R 232	R 232	R 207	R 216	R 212
G 193	G 180	G 148	G 89	G 47	G 103	G 158	G 169	G 196	G 109	G 141	G 164
B 186	B 173	B 139	B 84	B 43	B 107	B 168	B 179	B 206	B 117	B 140	B 149
R 197	R 205	R 206	R 198	R 193	R 217	R 224	R 229	R 230	R 189	R 193	R 201
G 185	G 191	G 188	G 157	G 105	G 123	G 147	G 162	G 183	G 91	G 117	G 138
B 185	B 190	B 186	B 153	B 100	B 133	B 160	B 168	B 194	B 102	B 126	B 133
R 200	R 206	R 211	R 213	R 208	R 215	R 222	R 228	R 232	R 225	R 223	R 221
G 188	G 193	G 192	G 185	G 145	G 130	G 139	G 150	G 179	G 177	G 184	G 193
B 190	B 194	B 192	B 181	B 150	B 144	B 153	B 162	B 190	B 179	B 184	B 183
R 197	R 199	R 202	R 206	R 213	R 220	R 220	R 227	R 230	R 228	R 233	R 230
G 175	G 177	G 174	G 175	G 162	G 157	G 129	G 154	G 184	G 195	G 211	G 221
B 183	B 183	B 179	B 177	B 171	B 175	B 145	B 169	B 199	B 194	B 211	B 218
R 182	R 193	R 201	R 206	R 215	R 222	R 215	R 221	R 222	R 226	R 232	R 232
G 155	G 166	G 173	G 168	G 171	G 166	G 114	G 170	G 187	G 202	G 218	G 228
B 164	B 177	B 187	B 184	B 182	B 187	B 127	B 181	B 196	B 204	B 218	B 225
R 191	R 198	R 204	R 207	R 216	R 215	R 207	R 215	R 220	R 221	R 226	R 233
G 163	G 170	G 175	G 172	G 168	G 137	G 109	G 166	G 183	G 196	G 212	G 226
B 177	B 185	B 191	B 186	B 184	B 155	B 119	B 183	B 200	B 207	B 216	B 226
R 194	R 201	R 205	R 204	R 206	R 201	R 201	R 210	R 217	R 221	R 223	R 229
G 165	G 174	G 174	G 154	G 128	G 92	G 109	G 156	G 179	G 195	G 205	G 212
B 183	B 191	B 192	B 171	B 151	B 108	B 118	B 173	B 197	B 209	B 213	B 218
R 180	R 184	R 182	R 188	R 198	R 198	R 201	R 202	R 211	R 220	R 228	R 229
G 144	G 133	G 112	G 102	G 105	G 104	G 102	G 123	G 161	G 189	G 204	G 216
B 158	B 149	B 132	B 121	B 127	B 124	B 118	B 140	B 178	B 207	B 218	B 225
R 166	R 180	R 189	R 196	R 210	R 216	R 218	R 210	R 208	R 216	R 225	R 230
G 120	G 127	G 135	G 142	G 155	G 168	G 167	G 143	G 141	G 183	G 200	G 216
B 131	B 140	B 149	B 156	B 171	B 190	B 188	B 164	B 157	B 198	B 216	B 228

Признаки для изо...



Для картинки 256x256
~ 200000 чисел

R 162	R 132	R 108	R 134	R 180	R 207	R 224	R 228	R 227	R 232	R 232	R 231
G 111	G 75	G 48	G 56	G 93	G 136	G 159	G 156	G 160	G 173	G 186	G 179
B 76	B 49	B 35	B 48	B 84	B 138	B 164	B 153	B 146	B 163	B 175	B 152
R 189	R 169	R 125	R 112	R 128	R 180	R 225	R 232	R 234	R 235	R 233	R 227
G 166	G 136	G 71	G 37	G 26	G 97	G 165	G 167	G 183	G 188	G 195	G 189
B 147	B 121	B 62	B 31	B 22	B 98	B 174	B 171	B 181	B 189	B 195	B 178
R 201	R 194	R 184	R 156	R 140	R 189	R 226	R 232	R 232	R 207	R 216	R 212
G 193	G 180	G 148	G 89	G 47	G 103	G 158	G 169	G 196	G 109	G 141	G 164
B 186	B 173	B 139	B 84	B 43	B 107	B 168	B 179	B 206	B 117	B 140	B 149
R 197	R 205	R 206	R 198	R 193	R 217	R 224	R 229	R 230	R 189	R 193	R 201
G 185	G 191	G 188	G 157	G 105	G 123	G 147	G 162	G 183	G 91	G 117	G 138
B 185	B 190	B 186	B 153	B 100	B 133	B 160	B 168	B 194	B 102	B 126	B 133
R 200	R 206	R 211	R 213	R 208	R 215	R 222	R 228	R 232	R 225	R 223	R 221
G 188	G 193	G 192	G 185	G 145	G 130	G 139	G 150	G 179	G 177	G 184	G 193
B 190	B 194	B 192	B 181	B 150	B 144	B 153	B 162	B 190	B 179	B 184	B 183
R 197	R 199	R 202	R 206	R 213	R 220	R 220	R 227	R 230	R 228	R 233	R 230
G 175	G 177	G 174	G 175	G 162	G 157	G 129	G 154	G 184	G 195	G 211	G 221
B 183	B 183	B 179	B 177	B 171	B 175	B 145	B 169	B 199	B 194	B 211	B 218
R 182	R 193	R 201	R 206	R 215	R 222	R 215	R 221	R 222	R 226	R 232	R 232
G 155	G 166	G 173	G 168	G 171	G 166	G 114	G 170	G 187	G 202	G 218	G 228
B 164	B 177	B 187	B 184	B 182	B 187	B 127	B 181	B 196	B 204	B 218	B 225
R 191	R 198	R 204	R 207	R 216	R 215	R 207	R 215	R 220	R 221	R 226	R 233
G 163	G 170	G 175	G 172	G 168	G 137	G 109	G 166	G 183	G 196	G 212	G 226
B 177	B 185	B 191	B 186	B 184	B 155	B 119	B 183	B 200	B 207	B 216	B 226
R 194	R 201	R 205	R 204	R 206	R 201	R 201	R 210	R 217	R 221	R 223	R 229
G 165	G 174	G 174	G 154	G 128	G 92	G 109	G 156	G 179	G 195	G 205	G 212
B 183	B 191	B 192	B 171	B 151	B 108	B 118	B 173	B 197	B 209	B 213	B 218
R 180	R 184	R 182	R 188	R 198	R 198	R 201	R 202	R 211	R 220	R 228	R 229
G 144	G 133	G 112	G 102	G 105	G 104	G 102	G 123	G 161	G 189	G 204	G 216
B 158	B 149	B 132	B 121	B 127	B 124	B 118	B 140	B 178	B 207	B 218	B 225
R 166	R 180	R 189	R 196	R 210	R 216	R 218	R 210	R 208	R 216	R 225	R 230
G 120	G 127	G 135	G 142	G 155	G 168	G 167	G 143	G 141	G 183	G 200	G 216
B 131	B 140	B 149	B 156	B 171	B 190	B 188	B 164	B 157	B 198	B 216	B 228

Сложности



Класс: кошка

Сложности



Класс: кошка

Сложности



Класс: кошка

Сложности



Класс: кошка

Инвариантность классификатора

- На класс **не** должны влиять
 - освещение,
 - угол обзора,
 - качество съемки,
 - разные виды одного класса (породы кошек, типы стульев и тд)
- “Классификатор инвариантен к _____ “

Почему для человека эта задача очевидна?

- Наша визуальная система на протяжении всей жизни создала такой классификатор, который инвариантен ко всему, что мы перечислили
- Мы видим изображение не как набор чисел, а как набор “высокоуровневых признаков”
- А как научить этому компьютер -- мы узнаем в этом модуле!

Итог

- Поставили задачу классификацию
- Осознали ее сложность для алгоритма
 - Нет высокоуровневых признаков -- сотни тысяч чисел
 - Серьезные требования к инвариантности

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Наивный подход к классификации

А можно обойтись без признаков?

- Если мы не знаем как получить высокоуровневые признаки, давайте использовать все значения цветов
- Если картинки похожи, то их цвета тоже похожи:
 - Можем посчитать попиксельную разницу
 - Для одинаковых картинок -- она равна нулю
 - Попробуем :)

Очень наивный подход



- Приведем к одному размеру
- Посчитаем попиксельную разницу и найдем самую “близкую” картинку из датасета
- Ее класс будет ответом

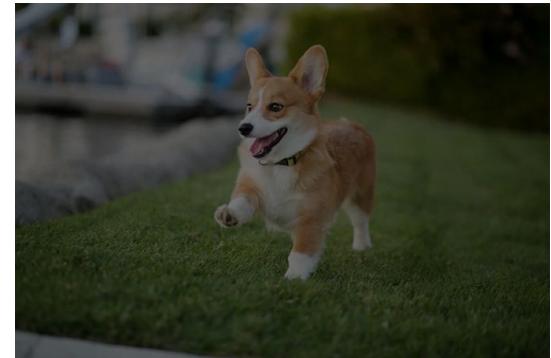


Очень наивный подход



- Приведем к одному размеру
- Посчитаем попиксельную разницу и найдем самую “близкую” картинку из датасета
- Ее класс будет ответом
- http://cs231n.github.io/assets/pixels_embed_cifar10_big.jpg

Очень наивный подход



- Нет инвариантности
- Расстояние до второй и третьей картинки очень большое
- Масштаб, поворот, изменение освещения, внутриклассовая изменчивость

Итог

- Группируя по цветы -- группируем скорее по фону
- Занимает большую часть изображения
- Только на цвет смотреть неправильно
- Нужно учитывать форму!

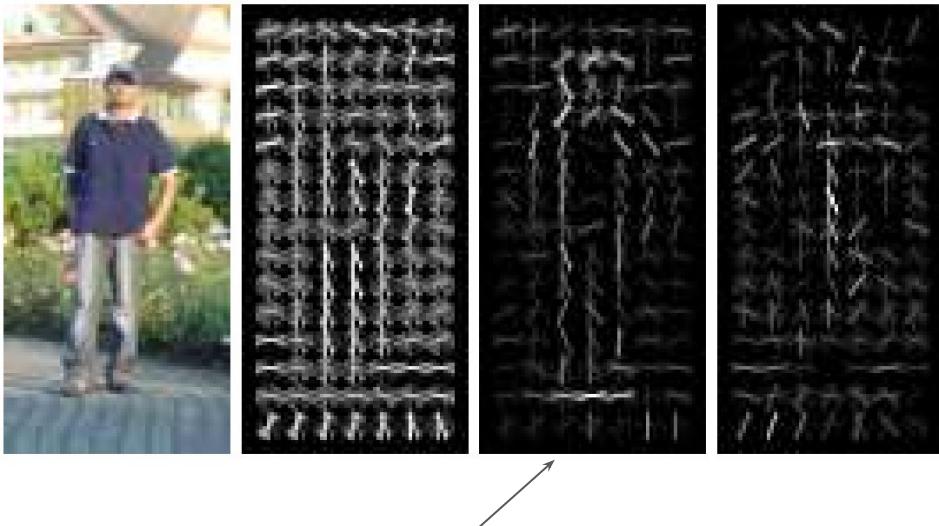
Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Смена парадигмы

Классификация изображений

- Узнали как изображения представлены в компьютере
- Поставили задачу классификации -- поняли ее сложность
- Поняли, что в этой задаче только на цвет смотреть неправильно
- Нужно учитывать форму

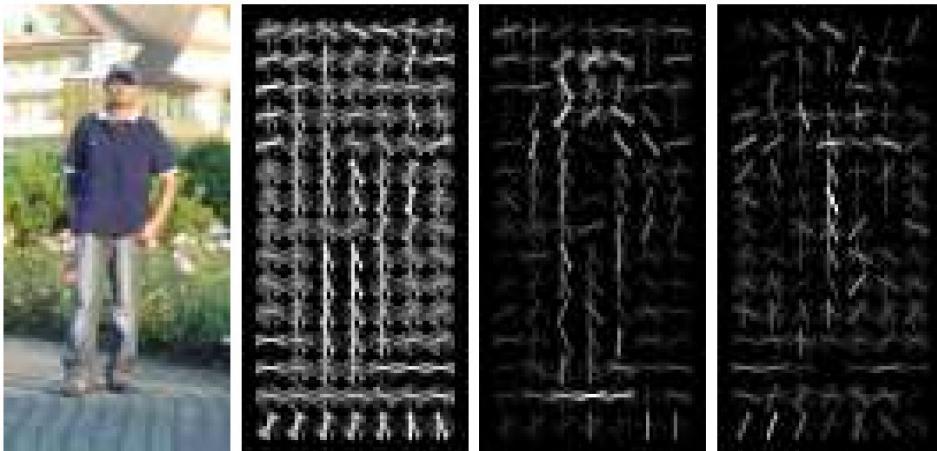
HOG



Признаки “положительно”
влияющие на класс “человек”

- “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection” Navneet Dalal and Bill Triggs, 2005
- Признаки: закодированное расположение и направления границ
- ~3000 признаков (зависит от размера картинки)

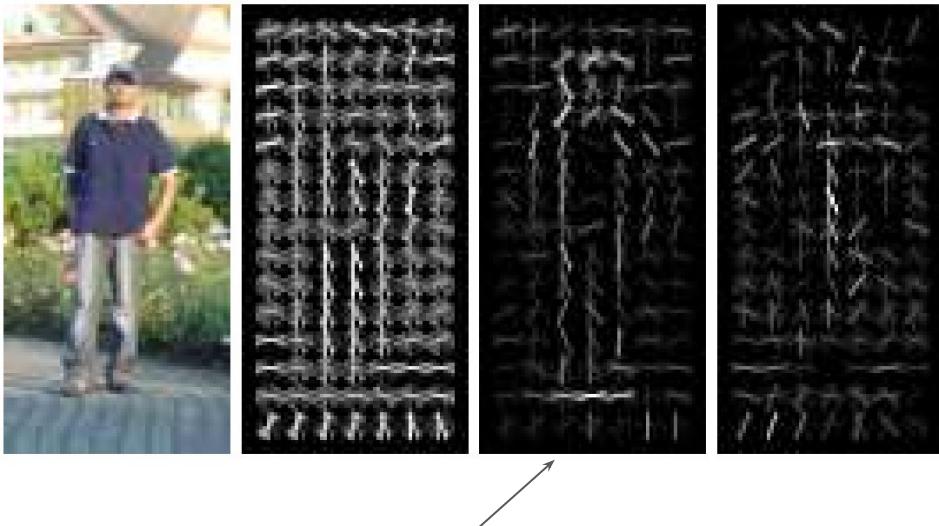
HOG



Признаки “положительно”
влияющие на класс “человек”

- “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection” Navneet Dalal and Bill Triggs, 2005
- Признаки: закодированное расположение и направления границ
- ~3000 признаков (зависит от размера картинки)
 - + линейный классификатор (SVM)

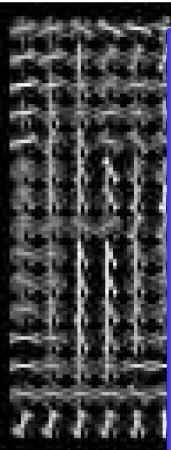
HOG



Признаки “положительно”
влияющие на класс “человек”

- “Histograms of Oriented Gradients for Human Detection” Navneet Dalal and Bill Triggs, 2005
- Признаки: закодированное расположение и направления границ
- ~3000 признаков (зависит от размера картинки)
 - + линейный классификатор (SVM)
- Такие признаки оказываются полезными -- например можно “обрисовать” форму человека

HOG



- Существует **много** способов получить подобные признаки
- Каждое улучшение в их вычислении приводило к новой научной статье
- **Придумать и доказать состоятельность признаков для разных задач -- очень сложно**

Признаки “положительно”
влияющие на класс “человек”

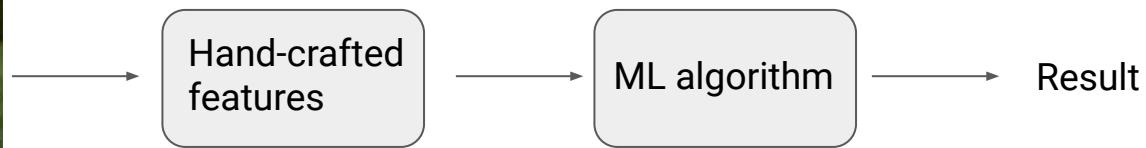
ent Gradients for
Navneet Dalal and Bill

рованное
направления границ
(зависит от размера

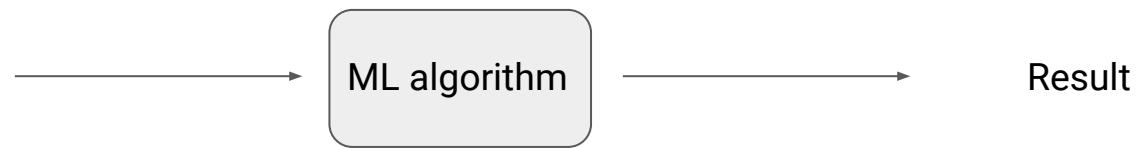
ификатор (SVM)
казываются
пример можно

“обрисовать” форму человека

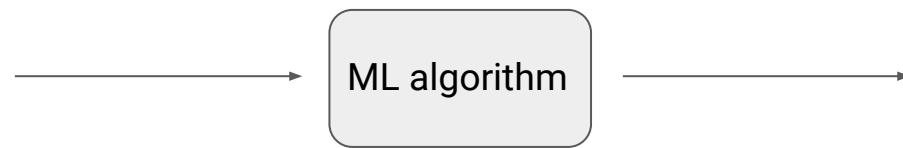
“Классический” подход



Representation learning



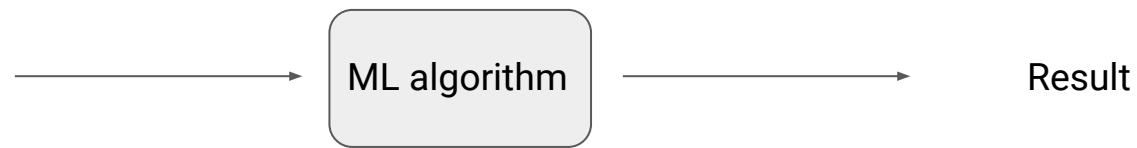
Representation learning



*Автоматически
выделить признаки,
полезные для решения
данной задачи*

*Определить как их
лучше всего
комбинировать для
получения результата*

Representation learning

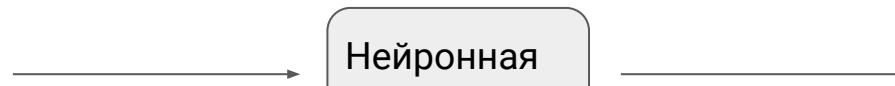


Автоматически
выделить признаки,
полезные для решения
данной задачи

Определить как их
лучше всего
комбинировать для
получения результата

Deep learning

Representation learning



Result

Автоматически выделить признаки, полезные для решения данной задачи

Определить как их лучше всего комбинировать для получения результата

Deep learning

Representation learning



- Нельзя применить “в лоб”
- Слишком много “сырых” признаков
- Добавление даже одного полносвязного слоя к такому количеству признаков увеличит количество параметров до сотен миллионов и при этом никакой полезной информации мы к этому моменту не получим

Result

полезные для решения
данной задачи

комбинировать для
получения результата

Deep learning

Representation learning



Сверточная нейронная сеть
(Convolutional Neural Network)

CNN

Result

Автоматически
выделить признаки,
полезные для решения
данной задачи

Определить как их
лучше всего
комбинировать для
получения результата

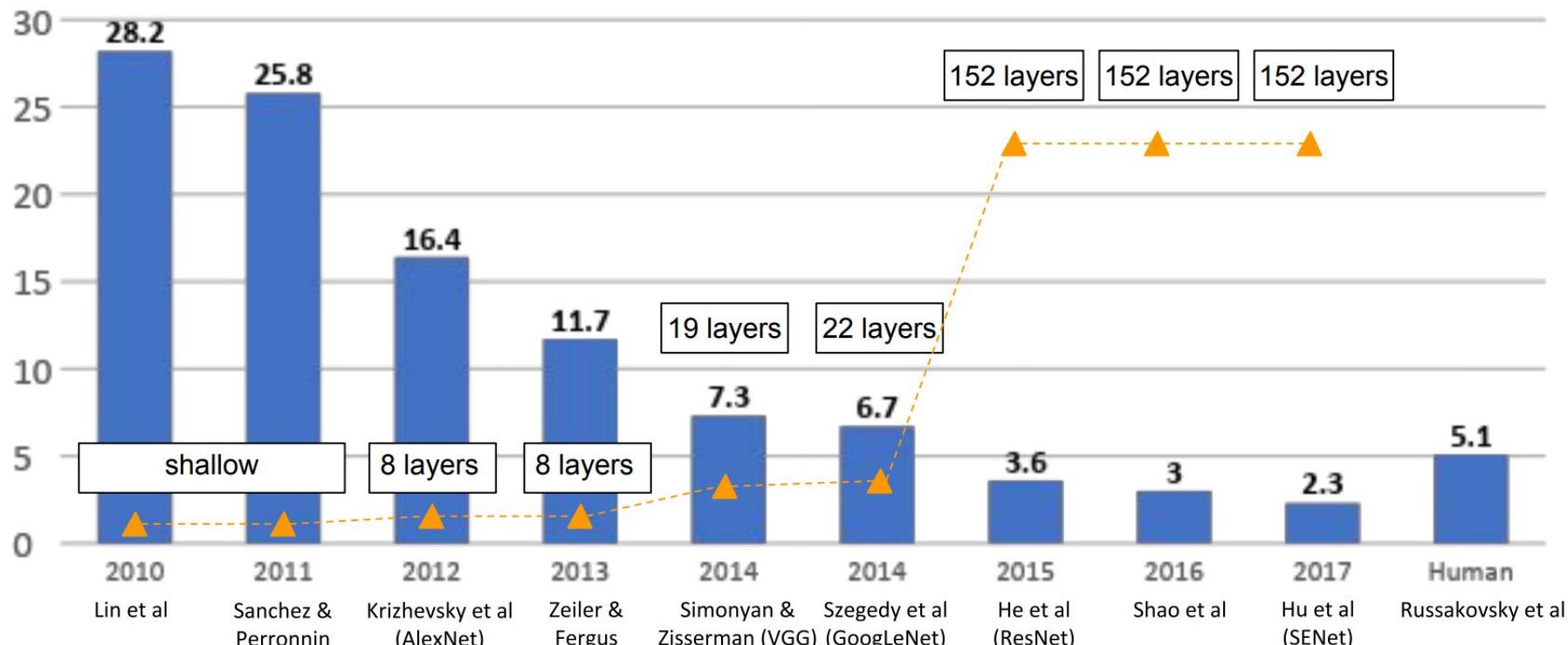
Deep learning

IMAGENET competition

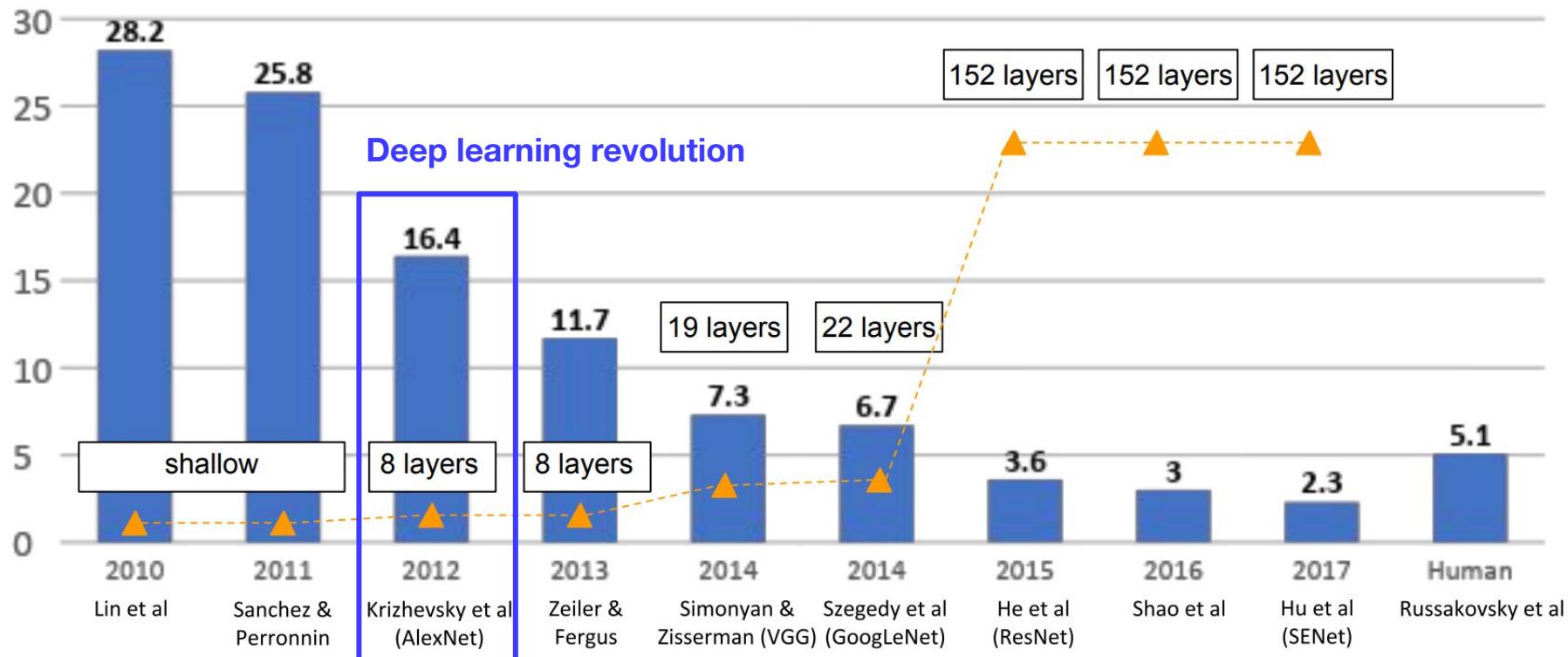
- Классификация изображений
- 1.2 миллиона изображений
- 1000 классов
- Top5 accuracy
 - Предсказать 5 классов
 - Если хотя бы один совпал -- считается правильным
- Ошибка человека -- 5.1%



ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) winners



ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) winners



Итог

- Увидели пример признаков, которые сконструировали специально для задачи классификации изображений
- Познакомились с классическим подходом к задаче классификации
- Сформулировали новый
- Ключевое звено -- сверточная нейронная сеть
- Узнаем что это такое в следующем уроке

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Свертки

R 189
G 129
B 88

Что это?

R 200	R 195	R 189
G 163	G 154	G 162
B 123	B 117	B 120
R 202	R 189	R 184
G 142	G 129	G 125
B 104	B 88	B 88
R 193	R 176	R 189
G 153	G 142	G 137
B 102	B 81	B 88

А это?

R 72	R 74	R 73	R 70	R 82	R 77	R 76	R 80
G 82	G 76	G 75	G 78	G 80	G 84	G 85	G 78
B 11	B 6	B 4	B 5	B 10	B 7	B 5	B 6
R 78	R 75	R 70	R 96	R 116	R 103	R 68	R 76
G 83	G 83	G 79	G 102	G 116	G 115	G 87	G 80
B 12	B 14	B 13	B 40	B 59	B 51	B 16	B 11
R 77	R 105	R 179	R 200	R 195	R 189	R 147	R 75
G 81	G 103	G 162	G 163	G 154	G 162	G 144	G 83
B 12	B 40	B 110	B 123	B 117	B 120	B 91	B 20
R 107	R 202	R 198	R 202	R 189	R 184	R 181	R 107
G 99	G 175	G 151	G 142	G 129	G 125	G 147	G 108
B 42	B 126	B 109	B 104	B 88	B 88	B 108	B 52
R 218	R 207	R 206	R 193	R 176	R 189	R 180	R 153
G 191	G 161	G 155	G 153	G 142	G 137	G 135	G 146
B 148	B 121	B 111	B 102	B 81	B 88	B 96	B 95
R 215	R 200	R 198	R 196	R 188	R 201	R 192	R 169
G 180	G 168	G 166	G 162	G 155	G 157	G 148	G 152
B 142	B 134	B 133	B 128	B 115	B 116	B 108	B 106
R 206	R 199	R 197	R 191	R 198	R 203	R 194	R 168
G 179	G 175	G 175	G 167	G 173	G 171	G 155	G 144
B 149	B 149	B 152	B 145	B 147	B 136	B 117	B 100

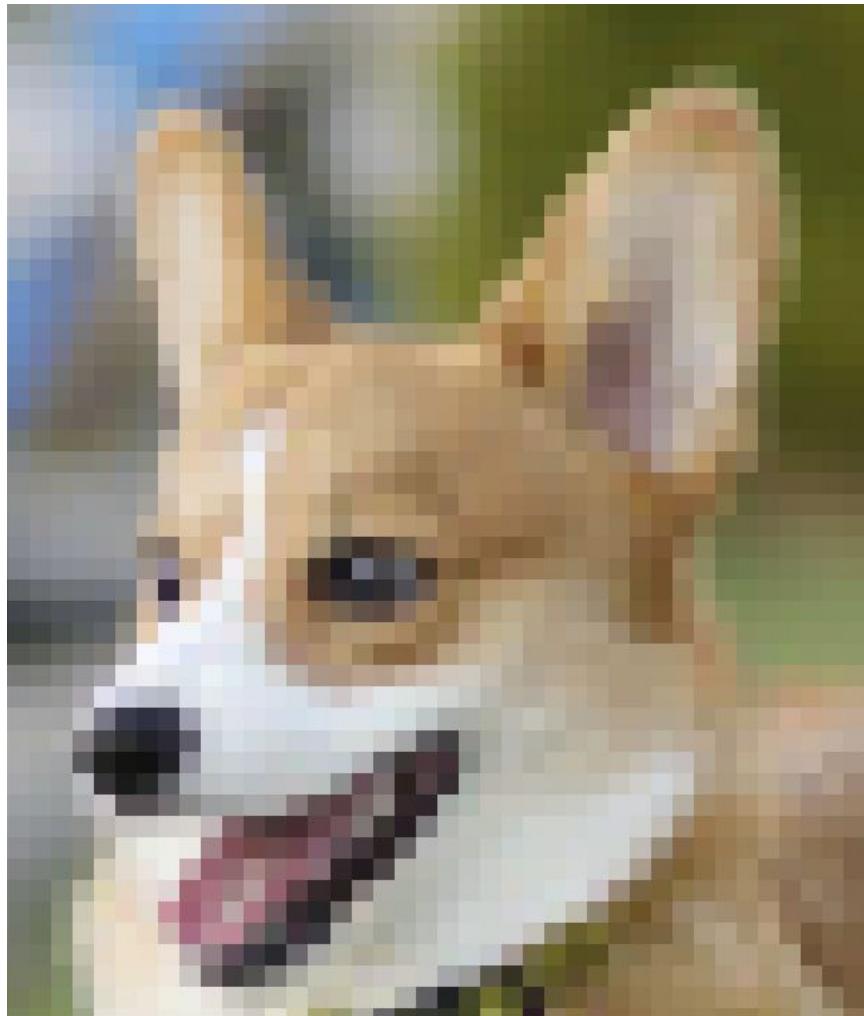
А это?



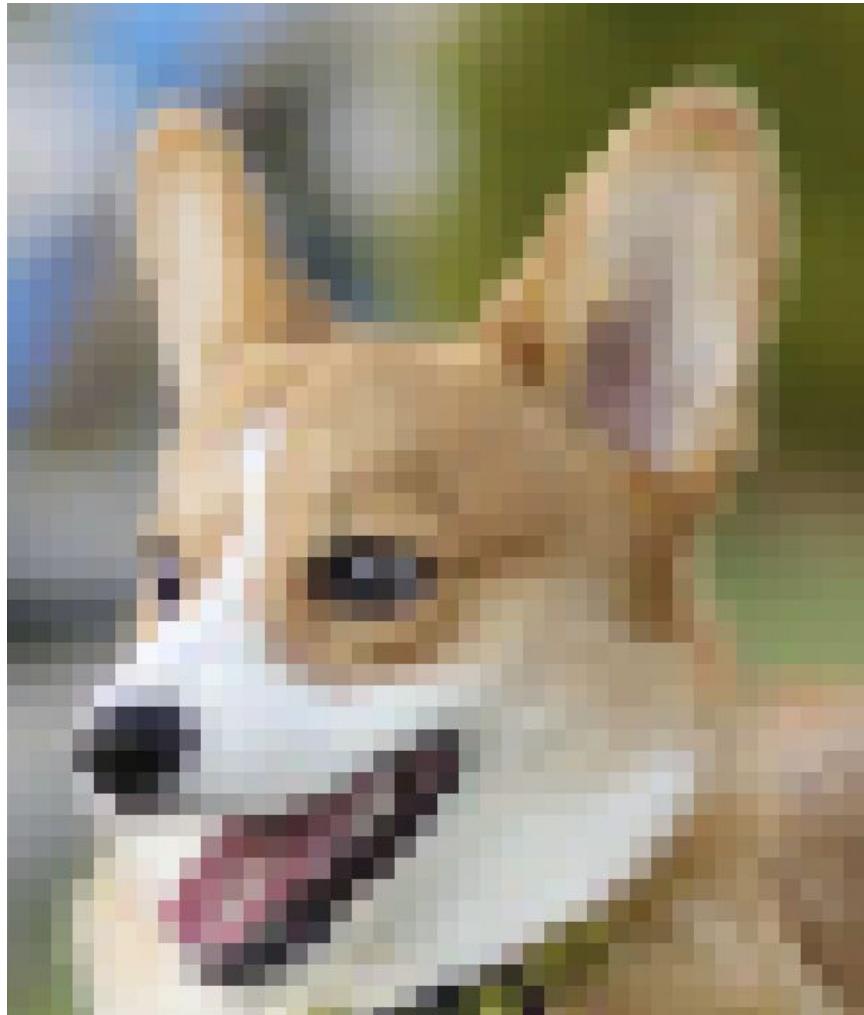
А это?

R 72	R 74	R 73	R 70	R 82	R 77	R 76	R 80
G 82	G 76	G 75	G 78	G 80	G 84	G 85	G 78
B 11	B 6	B 4	B 5	B 10	B 7	B 5	B 6
R 78	R 75	R 70	R 96	R 116	R 103	R 68	R 76
G 83	G 83	G 79	G 102	G 116	G 115	G 87	G 80
B 12	B 14	B 13	B 40	B 59	B 51	B 16	B 11
R 77	R 105	R 179	R 200	R 195	R 189	R 147	R 75
G 81	G 103	G 162	G 163	G 154	G 162	G 144	G 83
B 12	B 40	B 110	B 123	B 117	B 120	B 91	B 20
R 107	R 202	R 198	R 202	R 189	R 184	R 181	R 107
G 99	G 175	G 151	G 142	G 129	G 125	G 147	G 108
B 42	B 126	B 109	B 104	B 88	B 88	B 108	B 52
R 218	R 207	R 206	R 193	R 176	R 189	R 180	R 153
G 191	G 161	G 155	G 153	G 142	G 137	G 135	G 146
B 148	B 121	B 111	B 102	B 81	B 88	B 96	B 95
R 215	R 200	R 198	R 196	R 188	R 201	R 192	R 169
G 180	G 168	G 166	G 162	G 155	G 157	G 148	G 152
B 142	B 134	B 133	B 128	B 115	B 116	B 108	B 106
R 206	R 199	R 197	R 191	R 198	R 203	R 194	R 168
G 179	G 175	G 175	G 167	G 173	G 171	G 155	G 144
B 149	B 149	B 152	B 145	B 147	B 136	B 117	B 100

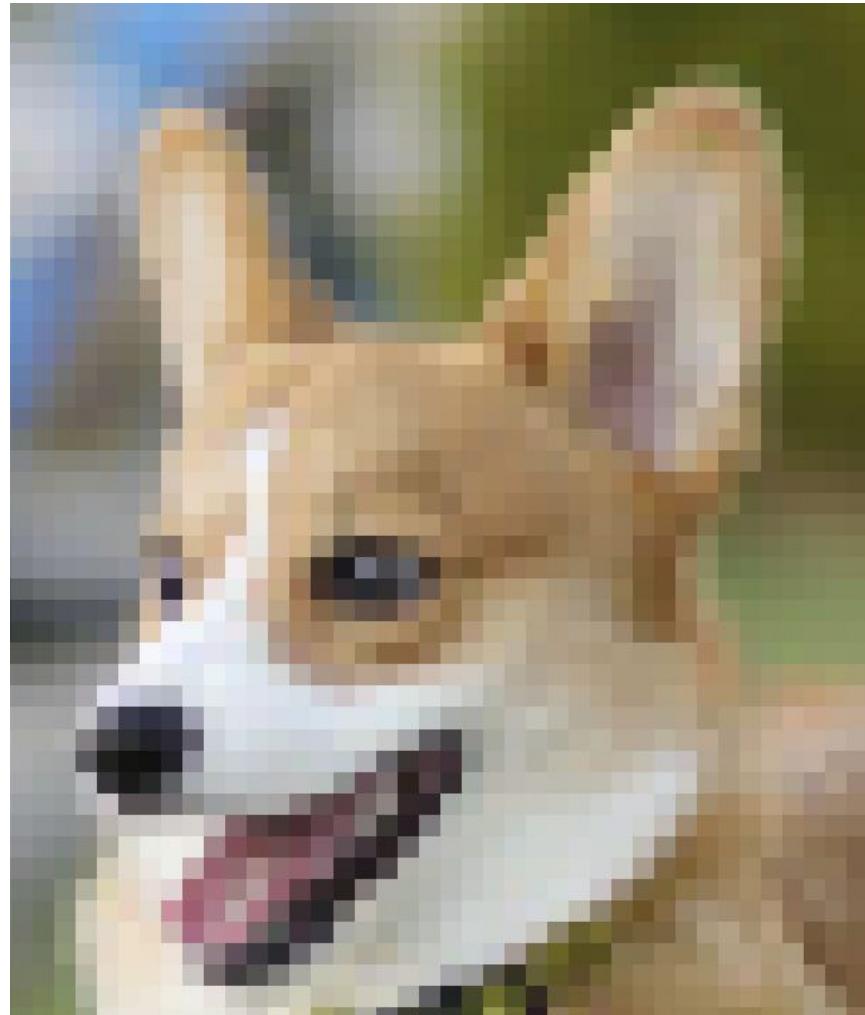
- Один пиксель -- не несет в себе полезной информации



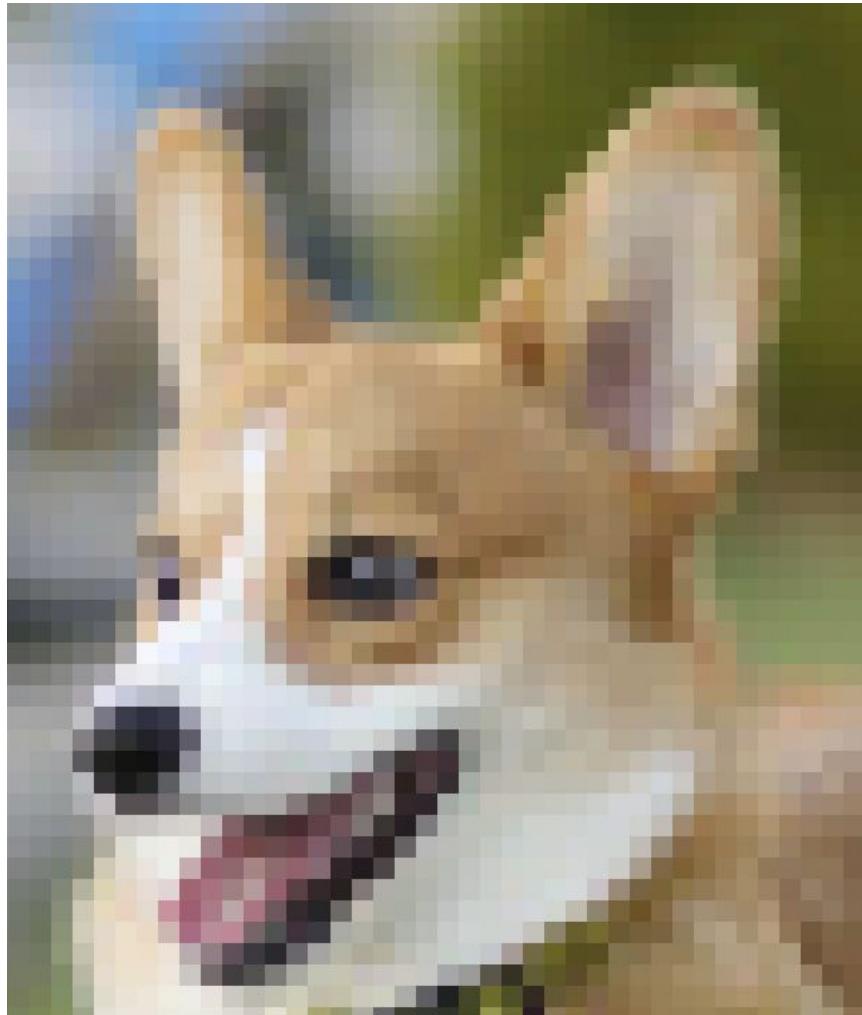
- Один пиксель -- не несет в себе полезной информации
- “Важные” признаки -- локальны
 - Окрестность изображения
 - “Резкий переход из темного в розовый под углом” ~ рот
 - “Темное пятно на более светлом фоне” ~ глаз или нос



- Один пиксель -- не несет в себе полезной информации
- “Важные” признаки -- локальны
 - Окрестность изображения
 - “Резкий переход из темного в розовый под углом” ~ рот
 - “Темное пятно на более светлом фоне” ~ глаз или нос
- И иерархичны
 - “Если мы нашли нос, глаз и рот, то это мордочка”



- Один пиксель -- не несет в себе полезной информации
- “Важные” признаки -- локальны
 - Окрестность изображения
 - “Резкий переход из темного в розовый под углом” ~ рот
 - “Темное пятно на более светлом фоне” ~ глаз или нос
- И иерархичны
 - “Если мы нашли нос, глаз и рот, то это мордочка”
- Не будем смотреть на всю картинку сразу -- начнем локально



Свёртки (convolutions)

3	3	2
0	0	1
3	1	2

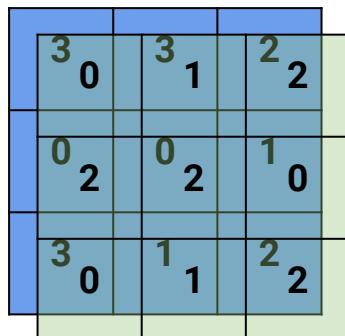
(*)

0	1	2
2	2	0
0	1	2

Исходный сигнал
(изображение)

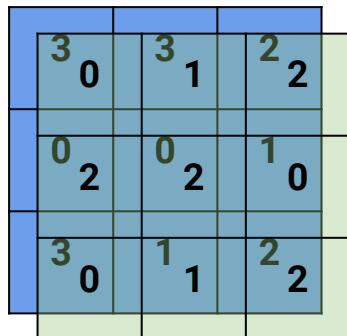
Фильтр

Свёртки (convolutions)



Исходный сигнал
(изображение)

Свёртки (convolutions)



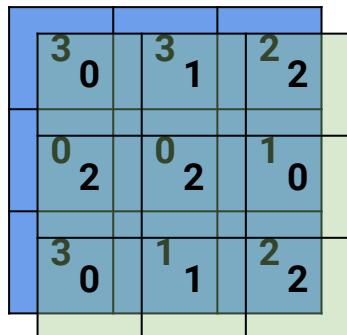
3*0 3*1 2*2

0*2 0*2 1*0

3*0 1*1 2*2

Исходный сигнал
(изображение)

Свёртки (convolutions)



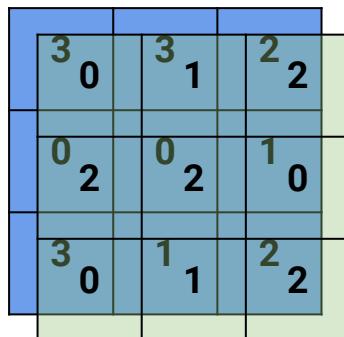
$$3*0 + 3*1 + 2*2 +$$

$$0*2 + 0*2 + 1*0 +$$

$$3*0 + 1*1 + 2*2$$

Исходный сигнал
(изображение)

Свёртки (convolutions)



$$3*0 + 3*1 + 2*2 +$$

$$0*2 + 0*2 + 1*0 +$$

$$3*0 + 1*1 + 2*2$$

 \equiv **12**

Исходный сигнал
(изображение)

Свёртки (convolutions)

3	3	2
0	0	1
3	1	2

⊗

0	1	2
2	2	0
0	1	2

$$3*0 + 3*1 + 2*2 +$$

$$0*2 + 0*2 + 1*0 +$$

$$3*0 + 1*1 + 2*2$$

12

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

Свёртки (convolutions)

3	3	2
0	0	1
3	1	2

(*)

0	1	2
2	2	0
0	1	2

$$3*0 + 3*1 + 2*2 +$$

$$0*0 + 0*2 + 1*0 +$$

$$3*0 + 1*1 + 2*2$$

12

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

*На самом деле это корреляция -- свертка транспонированная.

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2

Исходный сигнал
(изображение)



0	1	2
2	2	0
0	1	2

Фильтр



Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2

Исходный сигнал
(изображение)



0	1	2
2	2	0
0	1	2

Фильтр



Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2

Исходный сигнал
(изображение)



0	1	2
2	2	0
0	1	2

Фильтр



Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2

⊗

0	1	2
2	2	0
0	1	2



12

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

3*0	2*1	2*1
0*2	1*2	3*0
1*0	2*1	2*2

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2



0	1	2
2	2	0
0	1	2



12	12
----	----

3*0	2*1	2*1
0*2	1*2	3*0
1*0	2*1	2*2

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2

Исходный сигнал
(изображение)



0	1	2
2	2	0
0	1	2

Фильтр



12	12
----	----

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2



0	1	2
2	2	0
0	1	2



12	12
----	----

0*0	0*1	1*2
3*2	1*2	2*0
2*0	0*1	0*2

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2



0	1	2
2	2	0
0	1	2



12	12
10	

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

0*0	0*1	1*2
3*2	1*2	2*0
2*0	0*1	0*2

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2

Исходный сигнал
(изображение)



0	1	2
2	2	0
0	1	2

Фильтр



12	12
10	

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2



0	1	2
2	2	0
0	1	2



12	12
10	

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

0*0	1*1	3*2
1*2	2*2	2*0
2*0	0*1	2*2

Свёртки (convolutions)

3	3	2	1
0	0	1	3
3	1	2	2
2	0	0	2



0	1	2
2	2	0
0	1	2



12	12
10	17

Исходный сигнал
(изображение)

Фильтр

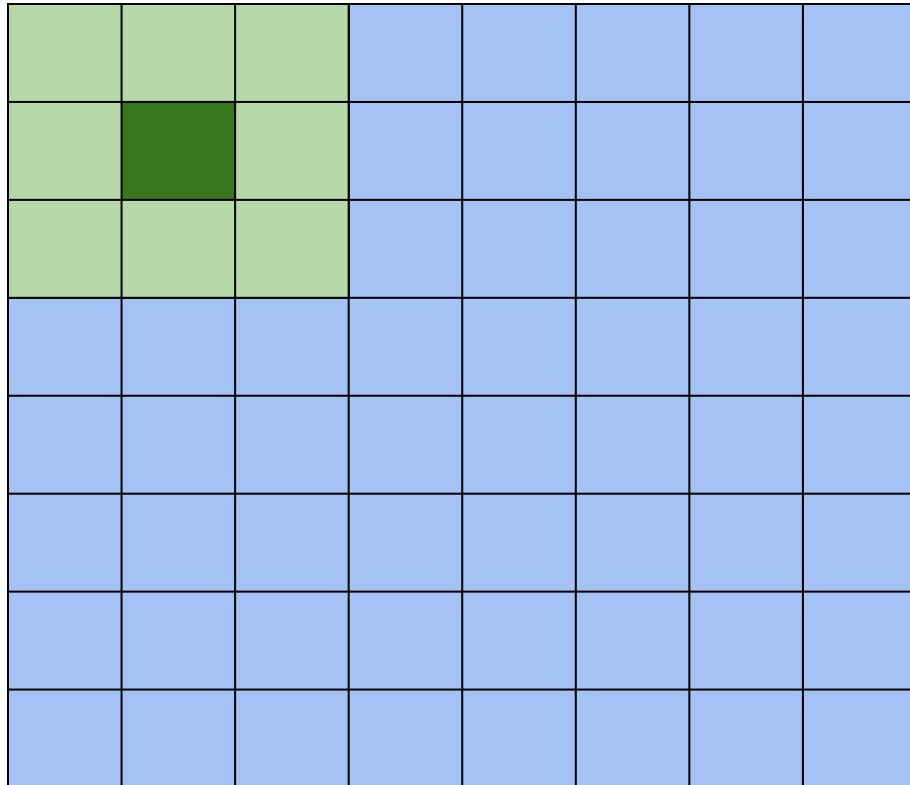
0*0	1*1	3*2
1*2	2*2	2*0
2*0	0*1	2*2

Свёртки (convolutions)

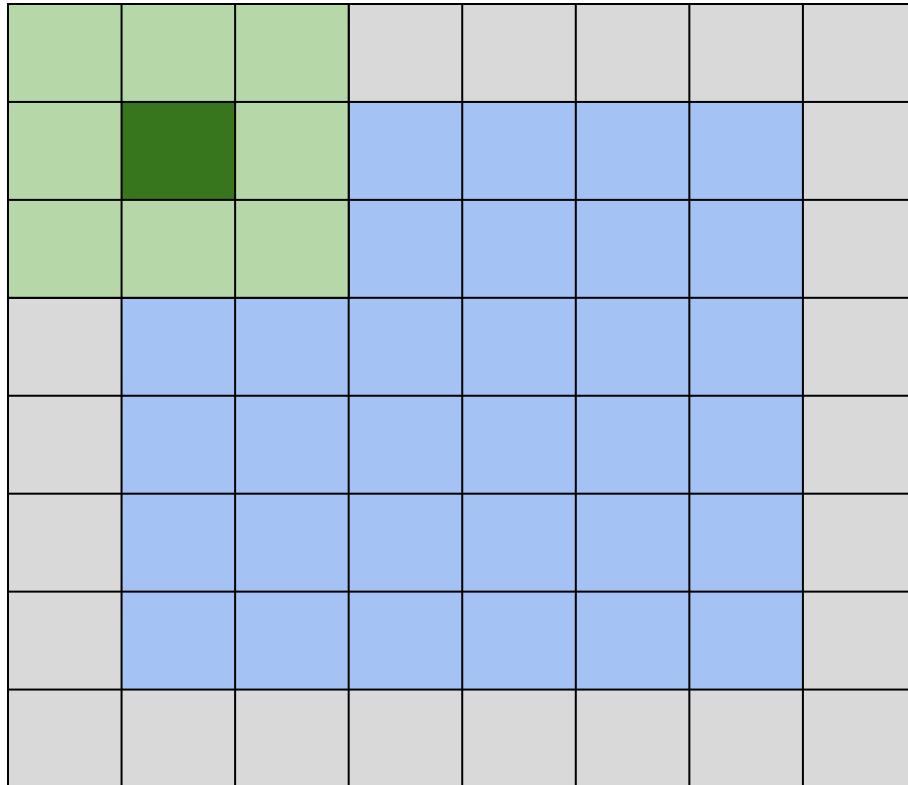
3 ₀	3 ₁	2 ₂	1	0
0 ₂	0 ₂	1 ₀	3	1
3 ₀	1 ₁	2 ₂	2	3
2	0	0	2	2
2	0	0	0	1

12.0	12.0	17.0
10.0	17.0	19.0
9.0	6.0	14.0

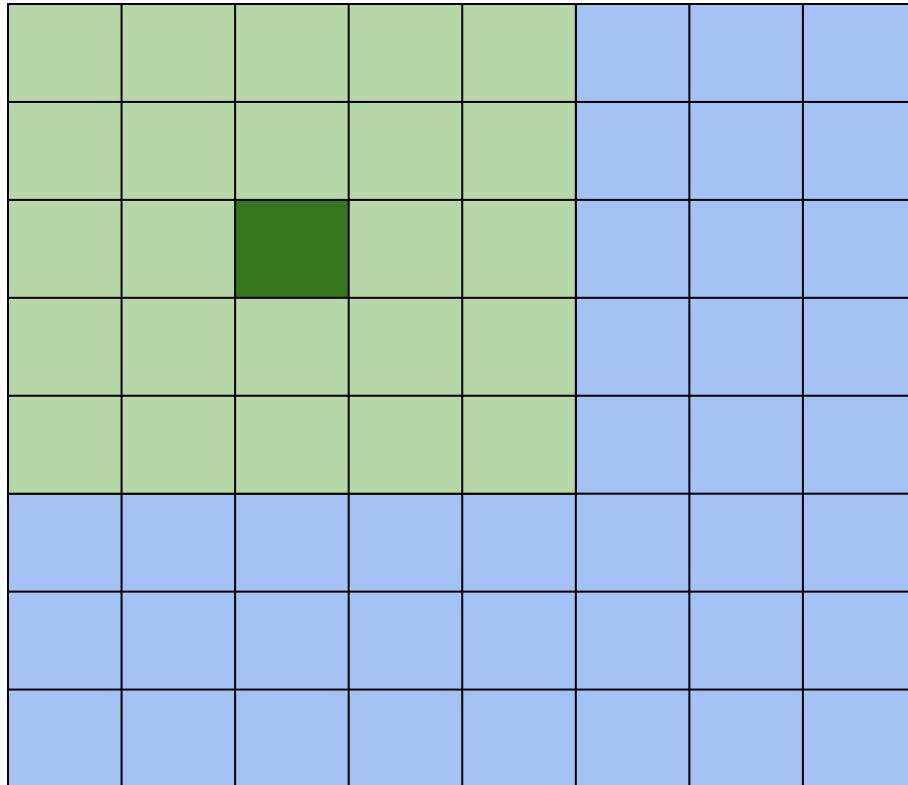
Уменьшение размера



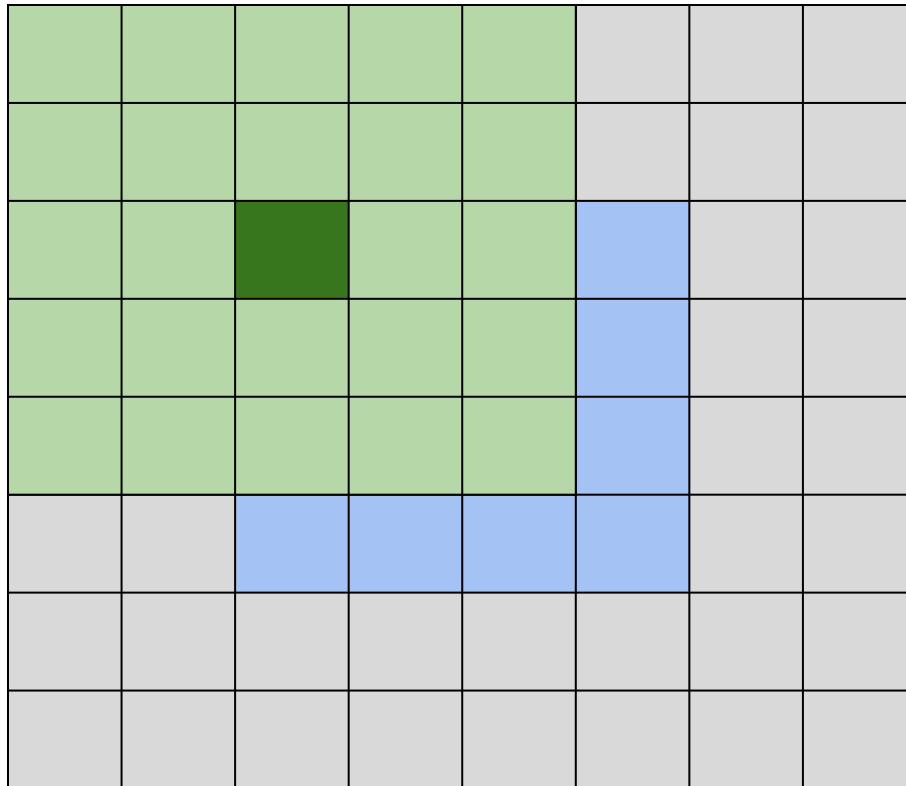
Уменьшение размера



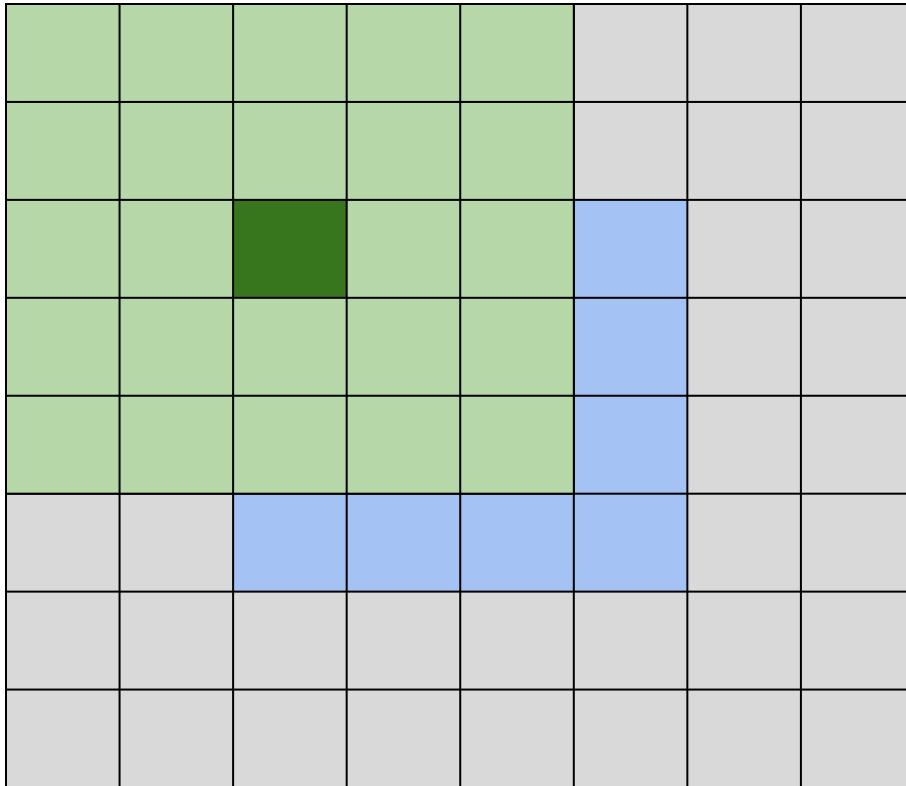
Уменьшение размера



Уменьшение размера



Уменьшение размера



- “Откусывает” половину размера с каждой стороны
- 5 -- 2, 3 -- 1

Sk***

j R 255	R 255	R 254	R 246	R 225	R 190	R 187	R 223	R 247	R 254	R 255	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 254	G 246	G 225	G 190	G 187	G 223	G 247	G 254	G 255	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 254	B 246	B 225	B 190	B 187	B 223	B 247	B 254	B 255	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 194	R 64	R 7	R 0	R 0	R 7	R 66	R 187	R 253	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 194	G 64	G 7	G 0	G 0	G 7	G 66	G 187	G 253	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 194	B 64	B 7	B 0	B 0	B 7	B 66	B 187	B 253	B 255	B 255
j R 255	R 238	R 35	R 0	R 123	R 211	R 211	R 121	R 0	R 33	R 225	R 255	R 255
j G 255	G 238	G 35	G 0	G 123	G 211	G 211	G 121	G 0	G 33	G 225	G 255	G 255
j B 255	B 238	B 35	B 0	B 123	B 211	B 211	B 121	B 0	B 33	B 225	B 255	B 255
j R 250	R 63	R 8	R 164	R 255	R 255	R 255	R 254	R 131	R 0	R 99	R 254	R 254
j G 250	G 63	G 8	G 164	G 255	G 255	G 255	G 254	G 131	G 0	G 99	G 254	G 254
j B 250	B 63	B 8	B 164	B 255	B 255	B 255	B 254	B 131	B 0	B 99	B 254	B 254
j R 200	R 0	R 58	R 239	R 255	R 255	R 255	R 255	R 249	R 27	R 8	R 242	R 242
j G 200	G 0	G 58	G 239	G 255	G 255	G 255	G 255	G 249	G 27	G 8	G 242	G 242
j B 200	B 0	B 58	B 239	B 255	B 255	B 255	B 255	B 249	B 27	B 8	B 242	B 242
j R 156	R 0	R 84	R 219	R 222	R 47	R 0	R 218	R 218				
j G 156	G 0	G 84	G 219	G 222	G 47	G 0	G 218	G 218				
j B 156	B 0	B 84	B 219	B 222	B 47	B 0	B 218	B 218				
j R 122	R 0	R 11	R 30	R 31	R 5	R 0	R 205	R 205				
j G 122	G 0	G 11	G 30	G 31	G 5	G 0	G 205	G 205				
j B 122	B 0	B 11	B 30	B 31	B 5	B 0	B 205	B 205				
j R 113	R 0	R 54	R 131	R 133	R 237	R 237						
j G 113	G 0	G 54	G 131	G 133	G 237	G 237						
j B 113	B 0	B 54	B 131	B 133	B 237	B 237						
j R 146	R 0	R 99	R 251	R 255								
j G 146	G 0	G 99	G 251	G 255								
j B 146	B 0	B 99	B 251	B 255								
j R 181	R 0	R 55	R 239	R 255								
j G 181	G 0	G 55	G 239	G 255								
j B 181	B 0	B 55	B 239	B 255								
j R 244	R 30	R 7	R 158	R 251	R 255	R 255	R 255	R 255	R 253	R 249	R 255	R 255
j G 244	G 30	G 7	G 158	G 251	G 255	G 255	G 255	G 255	G 253	G 249	G 255	G 255
j B 244	B 30	B 7	B 158	B 251	B 255	B 255	B 255	B 255	B 253	B 249	B 255	B 255
j R 255	R 205	R 18	R 11	R 103	R 202	R 232	R 225	R 181	R 112	R 138	R 255	R 255
j G 255	G 205	G 18	G 11	G 103	G 202	G 232	G 225	G 181	G 112	G 138	G 255	G 255
j B 255	B 205	B 18	B 11	B 103	B 202	B 232	B 225	B 181	B 112	B 138	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 173	R 37	R 9	R 0	R 0	R 0	R 0	R 17	R 125	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 173	G 37	G 9	G 0	G 0	G 0	G 0	G 17	G 125	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 173	B 37	B 9	B 0	B 0	B 0	B 0	B 17	B 125	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 254	R 225	R 177	R 146	R 140	R 144	R 155	R 195	R 243	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 254	G 225	G 177	G 146	G 140	G 144	G 155	G 195	G 243	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 254	B 225	B 177	B 146	B 140	B 144	B 155	B 195	B 243	B 255	B 255
j R 255	R 255											
j G 255	G 255											
j B 255	B 255											

1	1	1
1	1	1
1	1	1

*Рассматриваем как одноканальное

Sk***

j R 255	R 255	R 254	R 246	R 225	R 190	R 187	R 223	R 247	R 254	R 255	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 254	G 246	G 225	G 190	G 187	G 223	G 247	G 254	G 255	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 254	B 246	B 225	B 190	B 187	B 223	B 247	B 254	B 255	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 194	R 64	R 7	R 0	R 0	R 7	R 66	R 187	R 253	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 194	G 64	G 7	G 0	G 0	G 7	G 66	G 187	G 253	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 194	B 64	B 7	B 0	B 0	B 7	B 66	B 187	B 253	B 255	B 255
j R 255	R 238	R 35	R 0	R 123	R 211	R 211	R 121	R 0	R 33	R 225	R 255	R 255
j G 255	G 238	G 35	G 0	G 123	G 211	G 211	G 121	G 0	G 33	G 225	G 255	G 255
j B 255	B 238	B 35	B 0	B 123	B 211	B 211	B 121	B 0	B 33	B 225	B 255	B 255
j R 250	R 63	R 8	R 164	R 255	R 255	R 255	R 254	R 131	R 0	R 99	R 254	R 254
j G 250	G 63	G 8	G 164	G 255	G 255	G 255	G 254	G 131	G 0	G 99	G 254	G 254
j B 250	B 63	B 8	B 164	B 255	B 255	B 255	B 254	B 131	B 0	B 99	B 254	B 254
j R 200	R 0	R 58	R 239	R 255	R 255	R 255	R 255	R 249	R 27	R 8	R 242	R 242
j G 200	G 0	G 58	G 239	G 255	G 255	G 255	G 255	G 249	G 27	G 8	G 242	G 242
j B 200	B 0	B 58	B 239	B 255	B 255	B 255	B 255	B 249	B 27	B 8	B 242	B 242
j R 156	R 0	R 84	R 219	R 222	R 222	R 222	R 222	R 47	R 0	R 218	R 218	R 218
j G 156	G 0	G 84	G 219	G 222	G 222	G 222	G 222	G 47	G 0	G 218	G 218	G 218
j B 156	B 0	B 84	B 219	B 222	B 222	B 222	B 222	B 47	B 0	B 218	B 218	B 218
j R 122	R 0	R 11	R 30	R 31	R 5	R 0	R 205	R 205				
j G 122	G 0	G 11	G 30	G 31	G 31	G 31	G 31	G 5	G 0	G 205	G 205	G 205
j B 122	B 0	B 11	B 30	B 31	B 31	B 31	B 31	B 5	B 0	B 205	B 205	B 205
j R 113	R 0	R 54	R 131	R 133	R 237	R 237						
j G 113	G 0	G 54	G 131	G 133	G 237	G 237						
j B 113	B 0	B 54	B 131	B 133	B 237	B 237						
j R 146	R 0	R 99	R 251	R 255								
j G 146	G 0	G 99	G 251	G 255								
j B 146	B 0	B 99	B 251	B 255								
j R 181	R 0	R 55	R 239	R 255								
j G 181	G 0	G 55	G 239	G 255								
j B 181	B 0	B 55	B 239	B 255								
j R 244	R 30	R 7	R 158	R 251	R 255	R 255	R 255	R 255	R 253	R 249	R 255	R 255
j G 244	G 30	G 7	G 158	G 251	G 255	G 255	G 255	G 255	G 253	G 249	G 255	G 255
j B 244	B 30	B 7	B 158	B 251	B 255	B 255	B 255	B 255	B 253	B 249	B 255	B 255
j R 255	R 205	R 18	R 11	R 103	R 202	R 232	R 225	R 181	R 112	R 138	R 255	R 255
j G 255	G 205	G 18	G 11	G 103	G 202	G 232	G 225	G 181	G 112	G 138	G 255	G 255
j B 255	B 205	B 18	B 11	B 103	B 202	B 232	B 225	B 181	B 112	B 138	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 173	R 37	R 9	R 0	R 0	R 0	R 0	R 17	R 125	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 173	G 37	G 9	G 0	G 0	G 0	G 0	G 17	G 125	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 173	B 37	B 9	B 0	B 0	B 0	B 0	B 17	B 125	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 254	R 225	R 177	R 146	R 140	R 144	R 155	R 195	R 243	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 254	G 225	G 177	G 146	G 140	G 144	G 155	G 195	G 243	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 254	B 225	B 177	B 146	B 140	B 144	B 155	B 195	B 243	B 255	B 255
j R 255	R 255											
j G 255	G 255											
j B 255	B 255											

1	1	1
1	1	1
1	1	1

Сумма:

$$0 + 33 + 225 + 131 + 0 + 99 + 249 + 27 + 8 = 772$$

Sk***

j R 255	R 255	R 254	R 246	R 225	R 190	R 187	R 223	R 247	R 254	R 255	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 254	G 246	G 225	G 190	G 187	G 223	G 247	G 254	G 255	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 254	B 246	B 225	B 190	B 187	B 223	B 247	B 254	B 255	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 194	R 64	R 7	R 0	R 0	R 7	R 66	R 187	R 253	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 194	G 64	G 7	G 0	G 0	G 7	G 66	G 187	G 253	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 194	B 64	B 7	B 0	B 0	B 7	B 66	B 187	B 253	B 255	B 255
j R 255	R 238	R 35	R 0	R 123	R 211	R 211	R 121	R 0	R 33	R 225	R 255	R 255
j G 255	G 238	G 35	G 0	G 123	G 211	G 211	G 121	G 0	G 33	G 225	G 255	G 255
j B 255	B 238	B 35	B 0	B 123	B 211	B 211	B 121	B 0	B 33	B 225	B 255	B 255
j R 250	R 63	R 8	R 164	R 255	R 255	R 255	R 254	R 131	R 0	R 99	R 254	R 254
j G 250	G 63	G 8	G 164	G 255	G 255	G 255	G 254	G 131	G 0	G 99	G 254	G 254
j B 250	B 63	B 8	B 164	B 255	B 255	B 255	B 254	B 131	B 0	B 99	B 254	B 254
j R 200	R 0	R 58	R 239	R 255	R 255	R 255	R 255	R 249	R 27	R 8	R 242	R 242
j G 200	G 0	G 58	G 239	G 255	G 255	G 255	G 255	G 249	G 27	G 8	G 242	G 242
j B 200	B 0	B 58	B 239	B 255	B 255	B 255	B 255	B 249	B 27	B 8	B 242	B 242
j R 156	R 0	R 84	R 219	R 222	R 47	R 0	R 218	R 218				
j G 156	G 0	G 84	G 219	G 222	G 47	G 0	G 218	G 218				
j B 156	B 0	B 84	B 219	B 222	B 47	B 0	B 218	B 218				
j R 122	R 0	R 11	R 30	R 31	R 5	R 0	R 205	R 205				
j G 122	G 0	G 11	G 30	G 31	G 5	G 0	G 205	G 205				
j B 122	B 0	B 11	B 30	B 31	B 5	B 0	B 205	B 205				
j R 113	R 0	R 54	R 131	R 133	R 237	R 237						
j G 113	G 0	G 54	G 131	G 133	G 237	G 237						
j B 113	B 0	B 54	B 131	B 133	B 237	B 237						
j R 146	R 0	R 99	R 251	R 255								
j G 146	G 0	G 99	G 251	G 255								
j B 146	B 0	B 99	B 251	B 255								
j R 181	R 0	R 55	R 239	R 255								
j G 181	G 0	G 55	G 239	G 255								
j B 181	B 0	B 55	B 239	B 255								
j R 244	R 30	R 7	R 158	R 251	R 255	R 255	R 255	R 255	R 253	R 249	R 255	R 255
j G 244	G 30	G 7	G 158	G 251	G 255	G 255	G 255	G 255	G 253	G 249	G 255	G 255
j B 244	B 30	B 7	B 158	B 251	B 255	B 255	B 255	B 255	B 253	B 249	B 255	B 255
j R 255	R 205	R 18	R 11	R 103	R 202	R 232	R 225	R 181	R 112	R 138	R 255	R 255
j G 255	G 205	G 18	G 11	G 103	G 202	G 232	G 225	G 181	G 112	G 138	G 255	G 255
j B 255	B 205	B 18	B 11	B 103	B 202	B 232	B 225	B 181	B 112	B 138	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 173	R 37	R 9	R 0	R 0	R 0	R 0	R 17	R 125	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 173	G 37	G 9	G 0	G 0	G 0	G 0	G 17	G 125	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 173	B 37	B 9	B 0	B 0	B 0	B 0	B 17	B 125	B 255	B 255
j R 255	R 255	R 254	R 225	R 177	R 146	R 140	R 144	R 155	R 195	R 243	R 255	R 255
j G 255	G 255	G 254	G 225	G 177	G 146	G 140	G 144	G 155	G 195	G 243	G 255	G 255
j B 255	B 255	B 254	B 225	B 177	B 146	B 140	B 144	B 155	B 195	B 243	B 255	B 255
j R 255	R 255											
j G 255	G 255											
j B 255	B 255											

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Среднее:

$$(0 + 33 + 225 + 131 + 0 + 99 + 249 + 27 + 8)/9 = 85$$

Sk***

§ R 255	R 255	R 254	R 246	R 225	R 190	R 187	R 223	R 247	R 254	R 255	R 255	R 255
§ G 255	G 255	G 254	G 246	G 225	G 190	G 187	G 223	G 247	G 254	G 255	G 255	G 255
§ B 255	B 255	B 254	B 246	B 225	B 190	B 187	B 223	B 247	B 254	B 255	B 255	B 255
§ R 255	R 255	R 194	R 64	R 7	R 0	R 0	R 7	R 66	R 187	R 253	R 255	R 255
§ G 255	G 255	G 194	G 64	G 7	G 0	G 0	G 7	G 66	G 187	G 253	G 255	G 255
§ B 255	B 255	B 194	B 64	B 7	B 0	B 0	B 7	B 66	B 187	B 253	B 255	B 255
§ R 255	R 238	R 35	R 0	R 123	R 211	R 211	R 121	R 0	R 33	R 225	R 255	R 255
§ G 255	G 238	G 35	G 0	G 123	G 211	G 211	G 121	G 0	G 33	G 225	G 255	G 255
§ B 255	B 238	B 35	B 0	B 123	B 211	B 211	B 121	B 0	B 33	B 225	B 255	B 255
§ R 250	R 63	R 8	R 164	R 255	R 255	R 255	R 254	R 131	R 0	R 99	R 254	R 254
§ G 250	G 63	G 8	G 164	G 255	G 255	G 255	G 254	G 131	G 0	G 99	G 254	G 254
§ B 250	B 63	B 8	B 164	B 255	B 255	B 255	B 254	B 131	B 0	B 99	B 254	B 254
§ R 200	R 0	R 58	R 239	R 255	R 255	R 255	R 255	R 249	R 27	R 8	R 242	R 242
§ G 200	G 0	G 58	G 239	G 255	G 255	G 255	G 255	G 249	G 27	G 8	G 242	G 242
§ B 200	B 0	B 58	B 239	B 255	B 255	B 255	B 255	B 249	B 27	B 8	B 242	B 242
§ R 156	R 0	R 84	R 219	R 222	R 47	R 0	R 218	R 218				
§ G 156	G 0	G 84	G 219	G 222	G 47	G 0	G 218	G 218				
§ B 156	B 0	B 84	B 219	B 222	B 47	B 0	B 218	B 218				
§ R 122	R 0	R 11	R 30	R 31	R 5	R 0	R 205	R 205				
§ G 122	G 0	G 11	G 30	G 31	G 5	G 0	G 205	G 205				
§ B 122	B 0	B 11	B 30	B 31	B 5	B 0	B 205	B 205				
§ R 113	R 0	R 54	R 131	R 133	R 237	R 237						
§ G 113	G 0	G 54	G 131	G 133	G 237	G 237						
§ B 113	B 0	B 54	B 131	B 133	B 237	B 237						
§ R 146	R 0	R 99	R 251	R 255								
§ G 146	G 0	G 99	G 251	G 255								
§ B 146	B 0	B 99	B 251	B 255								
§ R 181	R 0	R 55	R 239	R 255								
§ G 181	G 0	G 55	G 239	G 255								
§ B 181	B 0	B 55	B 239	B 255								
§ R 244	R 30	R 7	R 158	R 251	R 255	R 255	R 255	R 255	R 253	R 249	R 255	R 255
§ G 244	G 30	G 7	G 158	G 251	G 255	G 255	G 255	G 255	G 253	G 249	G 255	G 255
§ B 244	B 30	B 7	B 158	B 251	B 255	B 255	B 255	B 255	B 253	B 249	B 255	B 255
§ R 255	R 205	R 18	R 11	R 103	R 202	R 232	R 225	R 181	R 112	R 138	R 255	R 255
§ G 255	G 205	G 18	G 11	G 103	G 202	G 232	G 225	G 181	G 112	G 138	G 255	G 255
§ B 255	B 205	B 18	B 11	B 103	B 202	B 232	B 225	B 181	B 112	B 138	B 255	B 255
§ R 255	R 255	R 173	R 37	R 9	R 0	R 0	R 0	R 0	R 17	R 125	R 255	R 255
§ G 255	G 255	G 173	G 37	G 9	G 0	G 0	G 0	G 0	G 17	G 125	G 255	G 255
§ B 255	B 255	B 173	B 37	B 9	B 0	B 0	B 0	B 0	B 17	B 125	B 255	B 255
§ R 255	R 255	R 254	R 225	R 177	R 146	R 140	R 144	R 155	R 195	R 243	R 255	R 255
§ G 255	G 255	G 254	G 225	G 177	G 146	G 140	G 144	G 155	G 195	G 243	G 255	G 255
§ B 255	B 255	B 254	B 225	B 177	B 146	B 140	B 144	B 155	B 195	B 243	B 255	B 255
§ R 255	R 255											
§ G 255	G 255											
§ B 255	B 255											

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Среднее: 255

Sk....

55 R 255 R 248	R 225 R 195	R 166 R 152 R 152	R 166 R 194	R 225 R 247 R 254 R 2
55 G 255 G 248	G 225 G 195	G 166 G 152 G 152	G 166 G 194	G 225 G 247 G 254 G 2
55 B 255 B 248	B 225 B 195	B 166 B 152 B 152	B 166 B 194	B 225 B 247 B 254 B 2
55 R 253 R 221 R 171	R 127 R 118 R 128 R 127	R 118 R 126 R 168	R 219 R 251 R 2	R 251 R 251 R 2
55 G 253 G 221 G 171	G 127 G 118 G 128 G 127	G 118 G 126 G 168	G 219 G 251 G 2	G 251 G 2
55 B 253 B 221 B 171	B 127 B 118 B 128 B 127	B 118 B 126 B 168	B 219 B 251 B 2	B 251 B 2
54 R 231 R 172 R 113 R 94	R 119 R 146 R 146	R 116 R 88 R 110	R 173 R 234 R 2	R 234 R 2
54 G 231 G 172 G 113 G 94	G 119 G 146 G 146	G 116 G 88 G 110	G 173 G 234 G 2	G 234 G 2
54 B 231 B 172 B 113 B 94	B 119 B 146 B 146	B 116 B 88 B 110	B 173 B 234 B 2	B 234 B 2
48 R 196 R 123 R 89 R 126	R 195 R 230 R 230	R 192 R 118 R 85	R 127 R 205 R 2	R 205 R 2
48 G 196 G 123 G 89 G 126	G 195 G 230 G 230	G 192 G 118 G 85	G 127 G 205 G 2	G 205 G 2
48 B 196 B 123 B 89 B 126	B 195 B 230 B 230	B 192 B 118 B 85	B 127 B 205 B 2	B 205 B 2
37 R 159 R 91 R 92 R 167	R 231 R 244 R 243 R 229	R 156 R 87 R 99	R 176 R 2	R 2
37 G 159 G 91 G 92 G 167	G 231 G 244 G 243 G 229	G 156 G 87 G 99	G 176 G 2	G 2
37 B 159 B 91 B 92 B 167	B 231 B 244 B 243 B 229	B 156 B 87 B 99	B 176 B 2	B 2
23 R 138 R 70 R 71 R 127	R 167 R 169 R 169 R 168	R 121 R 65 R 83	R 159 R 2	R 2
23 G 138 G 70 G 71 G 127	G 167 G 169 G 169 G 168	G 121 G 65 G 83	G 159 G 2	G 2
23 B 138 B 70 B 71 B 127	B 167 B 169 B 169 B 168	B 121 B 65 B 83	B 159 B 2	B 2
13 R 128 R 60 R 58 R 101	R 128 R 128 R 128 R 106	R 78 R 108 R 108	R 173 R 2	R 2
13 G 128 G 60 G 58 G 101	G 128 G 128 G 128 G 106	G 78 G 108 G 108	G 173 G 2	G 2
13 B 128 B 60 B 58 B 101	B 128 B 128 B 128 B 106	B 78 B 108 B 108	B 173 B 2	B 2
12 R 127 R 60 R 64 R 110	R 138 R 139 R 139 R 139	R 136 R 133 R 164	R 205 R 2	R 2
12 G 127 G 60 G 64 G 110	G 138 G 139 G 139 G 139	G 136 G 133 G 164	G 205 G 2	G 2
12 B 127 B 60 B 64 B 110	B 138 B 139 B 139 B 139	B 136 B 133 B 164	B 205 B 2	B 2
18 R 133 R 72 R 92 R 163	R 211 R 214 R 214 R 214	R 214 R 214 R 225 R 239	R 2 R 2	R 2
18 G 133 G 72 G 92 G 163	G 211 G 214 G 214 G 214	G 214 G 214 G 225 G 239	G 2 G 2	G 2
18 B 133 B 72 B 92 B 163	B 211 B 214 B 214 B 214	B 214 B 214 B 225 B 239	B 2 B 2	B 2
33 R 151 R 84 R 93 R 174	R 241 R 254 R 255	R 255 R 254 R 254 R 254	R 254 R 254 R 2	R 2
33 G 151 G 84 G 93 G 174	G 241 G 254 G 255	G 255 G 254 G 254 G 254	G 254 G 254 G 2	G 2
33 B 151 B 84 B 93 B 174	B 241 B 254 B 255	B 255 B 254 B 254 B 254	B 254 B 254 B 2	B 2
45 R 186 R 110 R 80 R 121	R 192 R 229 R 243 R 240	R 227 R 217 R 225 R 241	R 2 R 2	R 2
45 G 186 G 110 G 80 G 121	G 192 G 229 G 243 G 240	G 227 G 217 G 225 G 241	G 2 G 2	G 2
45 B 186 B 110 B 80 B 121	B 192 B 229 B 243 B 240	B 227 B 217 B 225 B 241	B 2 B 2	B 2
53 R 223 R 160 R 99 R 85	R 114 R 145 R 158 R 155	R 144 R 147 R 184 R 226	R 2 R 2	R 2
53 G 223 G 160 G 99 G 85	G 114 G 145 G 158 G 155	G 144 G 147 G 184 G 226	G 2 G 2	G 2
53 B 223 B 160 B 99 B 85	B 114 B 145 B 158 B 155	B 144 B 147 B 184 B 226	B 2 B 2	B 2
55 R 249 R 213 R 159 R 111	R 101 R 112 R 121 R 119	R 114 R 129 R 177 R 225	R 2 R 2	R 2
55 G 249 G 213 G 159 G 111	G 101 G 112 G 121 G 119	G 114 G 129 G 177 G 225	G 2 G 2	G 2
55 B 249 B 213 B 159 B 111	B 101 B 112 B 121 B 119	B 114 B 129 B 177 B 225	B 2 B 2	B 2
55 R 255 R 245 R 218 R 182	R 151 R 137 R 132 R 133	R 141 R 166 R 206 R 238	R 2 R 2	R 2
55 G 255 G 245 G 218 G 182	G 151 G 137 G 132 G 133	G 141 G 166 G 206 G 238	G 2 G 2	G 2
55 B 255 B 245 B 218 B 182	B 151 B 137 B 132 B 133	B 141 B 166 B 206 B 238	B 2 B 2	B 2
55 R 255 R 254 R 251 R 252	R 242 R 230 R 221 R 217	R 218 R 224 R 235 R 247 R 253	R 2 R 2	R 2
55 G 255 G 254 G 251 G 242	G 230 G 221 G 217 G 218	G 224 G 235 G 247 G 253	G 2 G 2	G 2
55 B 255 B 245 B 251 B 242	B 230 B 221 B 217 B 218	B 224 B 235 B 247 G 253	B 2 B 2	B 2

Sk....

55 R 255	R 248	R 225	R 195	R 166	R 152	R 152	R 166	R 194	R 225	R 247	R 254	R 2
55 G 255	G 248	G 225	G 195	G 166	G 152	G 152	G 166	G 194	G 225	G 247	G 254	G 2
55 B 255	B 248	B 225	B 195	B 166	B 152	B 152	B 166	B 194	B 225	B 247	B 254	B 2
55 R 253	R 221	R 171	R 127	R 118	R 128	R 127	R 118	R 126	R 168	R 219	R 251	R 2
55 G 253	G 221	G 171	G 127	G 118	G 128	G 127	G 118	G 126	G 168	G 219	G 251	G 2
55 B 253	B 221	B 171	B 127	B 118	B 128	B 127	B 118	B 126	B 168	B 219	B 251	B 2
54 R 231	R 172	R 113	R 94	R 119	R 146	R 146	R 116	R 88	R 110	R 173	R 234	R 2
54 G 231	G 172	G 113	G 94	G 119	G 146	G 146	G 116	G 88	G 110	G 173	G 234	G 2
54 B 231	B 172	B 113	B 94	B 119	B 146	B 146	B 116	B 88	B 110	B 173	B 234	B 2
48 R 196	R 123	R 89	R 126	R 195	R 230	R 230	R 192	R 118	R 85	R 127	R 205	R 2
48 G 196	G 123	G 89	G 126	G 195	G 230	G 230	G 192	G 118	G 85	G 127	G 205	G 2
48 B 196	B 123	B 89	B 126	B 195	B 230	B 230	B 192	B 118	B 85	B 127	B 205	B 2
37 R 159	R 91	R 92	R 167	R 231	R 244	R 243	R 229	R 156	R 87	R 99	R 176	R 2
37 G 159	G 91	G 92	G 167	G 231	G 244	G 243	G 229	G 156	G 87	G 99	G 176	G 2
37 B 159	B 91	B 92	B 167	B 231	B 244	B 243	B 229	B 156	B 87	B 99	B 176	B 2
23 R 138	R 70	R 71	R 127	R 167	R 169	R 169	R 168	R 121	R 65	R 83	R 159	R 2
23 G 138	G 70	G 71	G 127	G 167	G 169	G 169	G 168	G 121	G 65	G 83	G 159	G 2
23 B 138	B 70	B 71	B 127	B 167	B 169	B 169	B 168	B 121	B 65	B 83	B 159	B 2
13 R 128	R 60	R 58	R 101	R 128	R 128	R 128	R 128	R 106	R 78	R 108	R 173	R 2
13 G 128	G 60	G 58	G 101	G 128	G 128	G 128	G 128	G 106	G 78	G 108	G 173	G 2
13 B 128	B 60	B 58	B 101	B 128	B 128	B 128	B 128	B 106	B 78	B 108	B 173	B 2
12 R 127	R 60	R 64	R 110	R 138	R 139	R 139	R 139	R 136	R 133	R 164	R 205	R 2
12 G 127	G 60	G 64	G 110	G 138	G 139	G 139	G 139	G 136	G 133	G 164	G 205	G 2
12 B 127	B 60	B 64	B 110	B 138	B 139	B 139	B 139	B 136	B 133	B 164	B 205	B 2
18 R 133	R 72	R 92	R 163	R 211	R 214	R 214	R 214	R 214	R 225	R 239	R 2	
18 G 133	G 72	G 92	G 163	G 211	G 214	G 214	G 214	G 214	G 225	G 239	G 2	
18 B 133	B 72	B 92	B 163	B 211	B 214	B 214	B 214	B 214	B 225	B 239	B 2	
33 R 151	R 84	R 93	R 174	R 241	R 254	R 255	R 255	R 254	R 254	R 254	R 254	R 2
33 G 151	G 84	G 93	G 174	G 241	G 254	G 255	G 255	G 254	G 254	G 254	G 254	G 2
33 B 151	B 84	B 93	B 174	B 241	B 254	B 255	B 255	B 254	B 254	B 254	B 254	B 2
45 R 186	R 110	R 80	R 121	R 192	R 229	R 243	R 240	R 227	R 217	R 225	R 241	R 2
45 G 186	G 110	G 80	G 121	G 192	G 229	G 243	G 240	G 227	G 217	G 225	G 241	G 2
45 B 186	B 110	B 80	B 121	B 192	B 229	B 243	B 240	B 227	B 217	B 225	B 241	B 2
53 R 223	R 160	R 99	R 85	R 114	R 145	R 158	R 155	R 144	R 147	R 184	R 226	R 2
53 G 223	G 160	G 99	G 85	G 114	G 145	G 158	G 155	G 144	G 147	G 184	G 226	G 2
53 B 223	B 160	B 99	B 85	B 114	B 145	B 158	B 155	B 144	B 147	B 184	B 226	B 2
55 R 249	R 213	R 159	R 111	R 101	R 112	R 121	R 119	R 114	R 129	R 177	R 225	R 2
55 G 249	G 213	G 159	G 111	G 101	G 112	G 121	G 119	G 114	G 129	G 177	G 225	G 2
55 B 249	B 213	B 159	B 111	B 101	B 112	B 121	B 119	B 114	B 129	B 177	B 225	B 2
55 R 255	R 245	R 218	R 182	R 151	R 137	R 132	R 133	R 141	R 166	R 206	R 238	R 2
55 G 255	G 245	G 218	G 182	G 151	G 137	G 132	G 133	G 141	G 166	G 206	G 238	G 2
55 B 255	B 245	B 218	B 182	B 151	B 137	B 132	B 133	B 141	B 166	B 206	B 238	B 2
55 R 255	R 254	R 251	R 242	R 230	R 221	R 217	R 218	R 224	R 235	R 247	R 253	R 2
55 G 255	G 254	G 251	G 242	G 230	G 221	G 217	G 218	G 224	G 235	G 247	G 253	G 2
55 B 255	B 254	B 251	B 242	B 230	B 221	G 217	G 218	G 224	G 235	G 247	G 253	G 2

Усреднили окрестность --
размыли изображение

Свёртки (convolutions)



⊗

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

≡



Свёртки (convolutions)



⊗

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

≡

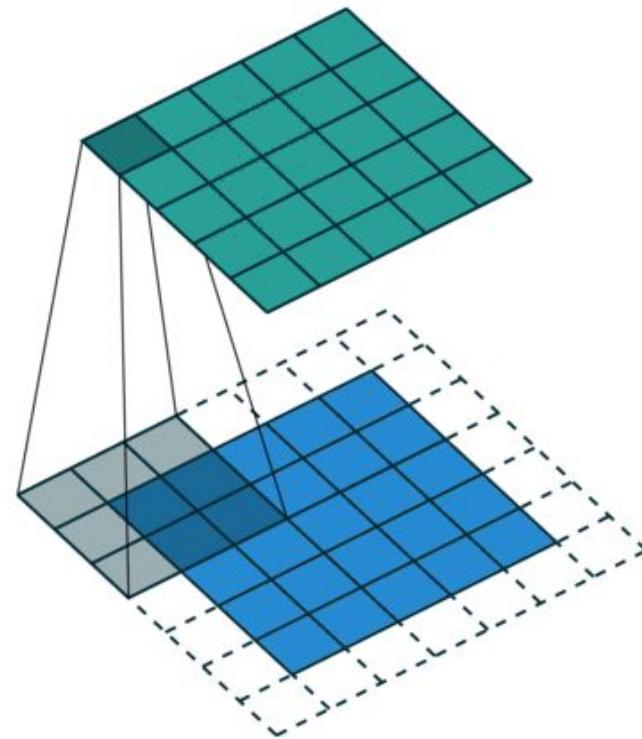


680x453

678x451

Свёртки (convolutions)

Padding



Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0		
0	600	600	0	-80	-80	0		
0	600	600	0	-80	-80	0		
0	600	600	0	-80	-80	0		

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0		
0	600	600	0	-80	-80	0		
0	600	600	0	-80	-80	0		
0	600	600	0	-80	-80	0		

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

“Однотонные области”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

“Однотонные области”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

“Однотонные области”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

“Слева ярче, чем справа”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

“Слева ярче, чем справа”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

“Справа ярче, чем слева”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

“Справа ярче, чем слева”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

Skillbox

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0
0	600	600	0	-80	-80	0

- 0 -- там где однотонно
- Положительно -- если слева ярче, чем справа
- Отрицательно -- справа ярче, чем слева
- Модуль -- “насколько сильно отличается яркость”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20
150	150	150	0	0	0	20	20	20

0	600	600	0	80	80	0
0	600	600	0	80	80	0
0	600	600	0	80	80	0
0	600	600	0	80	80	0

- 0 -- там где однотонно
- Положительно -- если слева ярче, чем справа
- Отрицательно -- справа ярче, чем слева
- Модуль -- “насколько сильно отличается яркость”

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

Детектор вертикальных линий!

Свёртки (convolutions)



$$\begin{matrix} \otimes & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline 2 & 0 & -2 \\ \hline 1 & 0 & -1 \\ \hline \end{array} & = & \begin{array}{|c|} \hline \\ \hline \\ \hline \end{array} \end{matrix}$$

Свёртки (convolutions)



⊗

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

≡



Свёртки (convolutions)



$$\begin{matrix} \otimes & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline \end{array} & = & \begin{array}{|c|} \hline \\ \hline \\ \hline \end{array} \end{matrix}$$

Свёртки (convolutions)



⊗

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

≡



Итог

- Один пиксель -- ничего не значит, важна его окрестность
- Свертка -- математическая операция, которая преобразует входной сигнал -- в выходной. В нашем случае сигнал -- это изображение.
- При этом она умеет учитывать окрестность каждого пикселя.
- Свертки могут иметь “физический смысл”. Например, детектировать линии, размывать изображение.
- В следующем уроке -- продолжим знакомство с ними.

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Многоканальные свертки

Свертки

- Свертки могут, например, помогать нам искать линии. Причем там, где линия ярче или более близка в вертикальной -- детектор вертикальных линий выдает большие значения. И наоборот.
- А теперь давайте вообразим, что мы придумали свертку, которая умеет искать не линии, а например собачьи глаза?

Свёртки (convolutions)



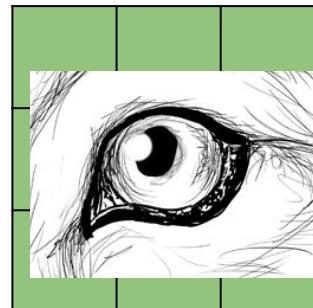
*



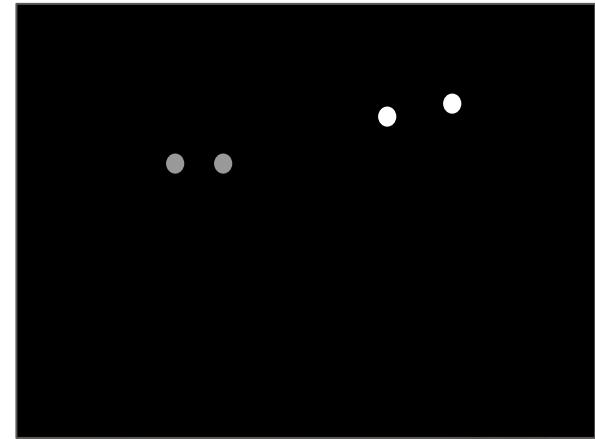
Свёртки (convolutions)



*



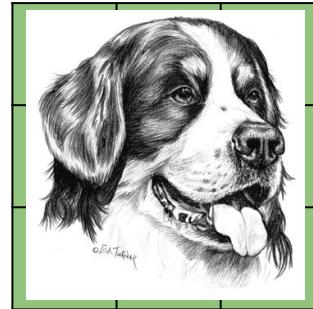
=



Свёртки (convolutions)



*

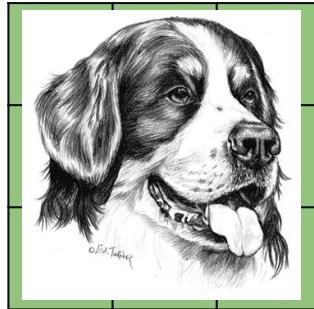


=

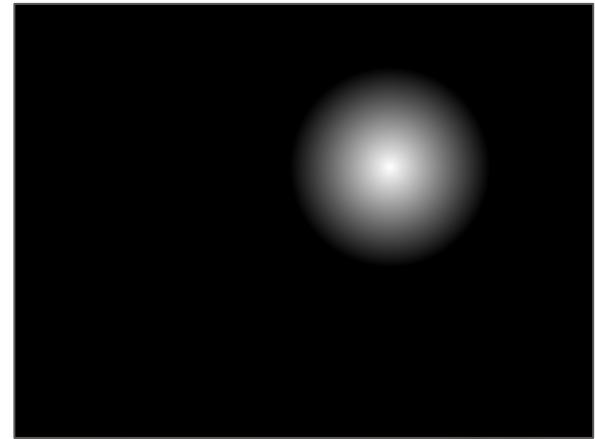
Свёртки (convolutions)



*



=



Как придумать такие полезные фильтры?

- Выучить их из данных
- Ведь нейронная сеть умеет сама конструировать признаки!

Как придумать такие полезные фильтры?

- Выучить их из данных
- Ведь нейронная сеть умеет сама конструировать признаки!
- Нужно только дать ей такую возможность -- соорудить такую архитектуру, которая будет использовать свертки
- А именно построить сверточный слой!

Как придумать такие полезные фильтры?

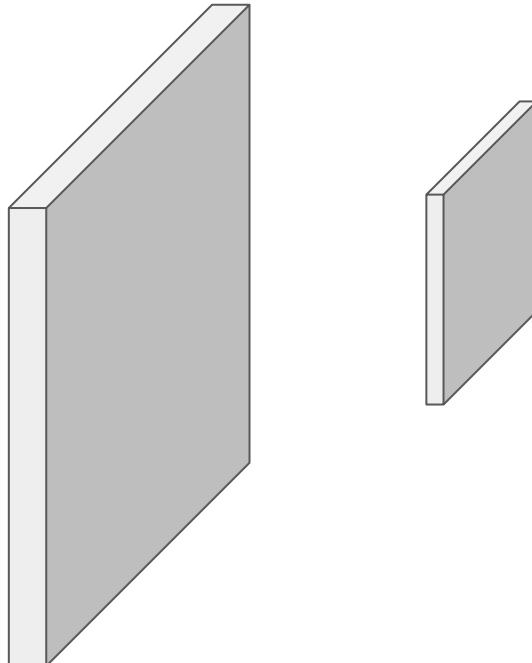
- Выучить их из данных
- Ведь нейронная сеть умеет сама конструировать признаки!
- Нужно только дать ей такую возможность -- соорудить такую архитектуру, которая будет использовать свертки
- А именно построить сверточный слой!
- Применять их один за другим и усложнять признаки

Как придумать такие полезные фильтры?

- Выучить их из данных
- Ведь нейронная сеть умеет сама конструировать признаки!
- Нужно только дать ей такую возможность -- соорудить такую архитектуру, которая будет использовать свертки
- А именно построить сверточный слой!
- Применять их один за другим и усложнять признаки
- Нужно обобщить свертку на бОльшие измерения
 - В полносвязной сети: больше полносвязных слоев с бОльшим числом нейронов --> сложнее признаки
 - В сверточной: больше сверточных слоев с большим числом фильтров --> сложнее признаки

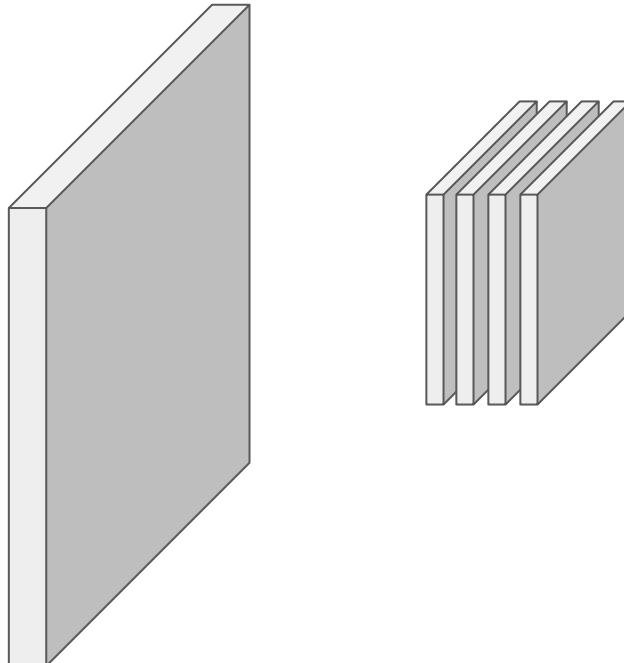
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



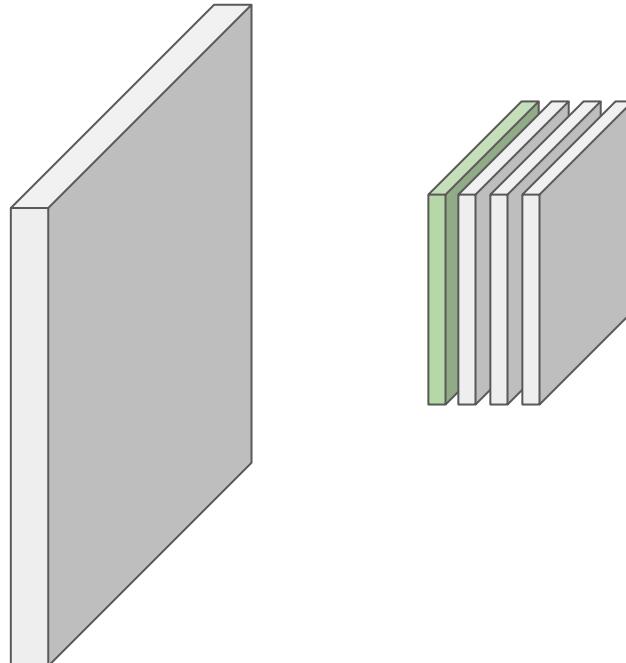
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



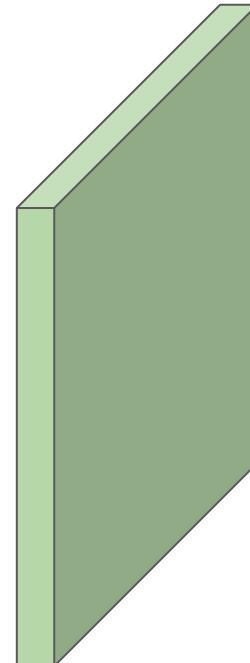
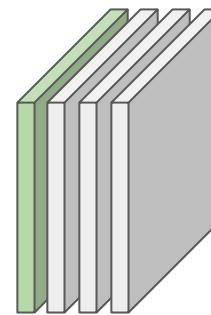
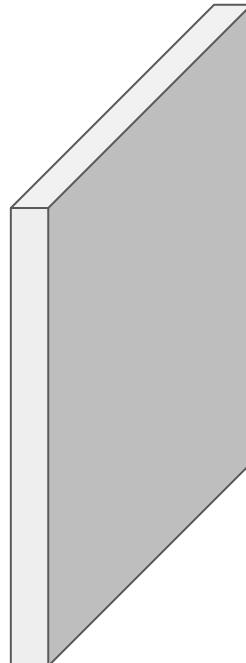
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



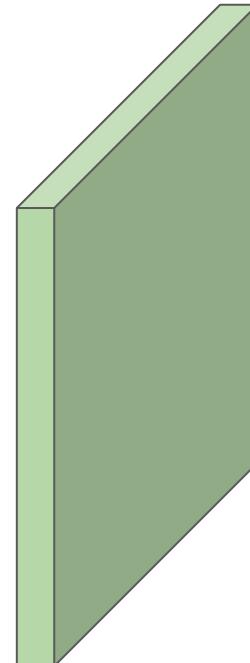
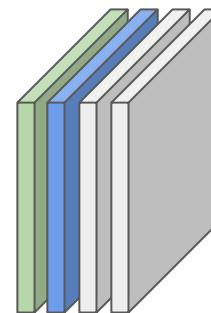
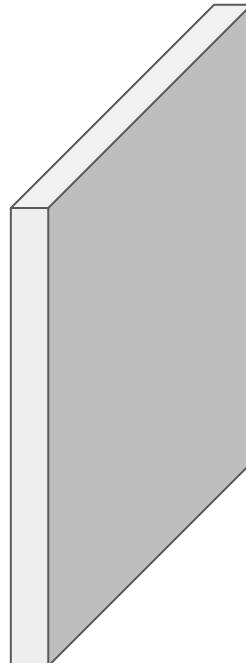
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



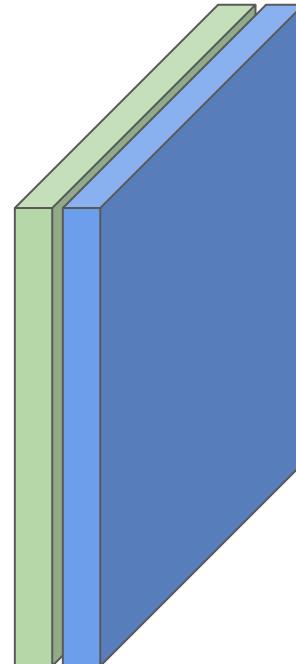
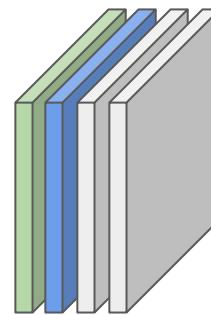
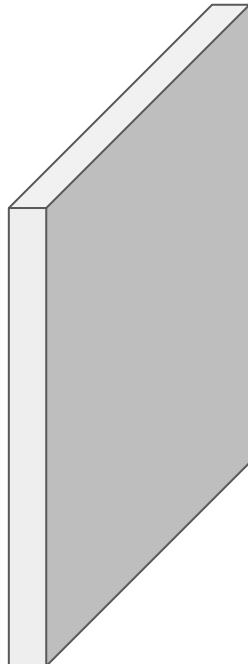
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



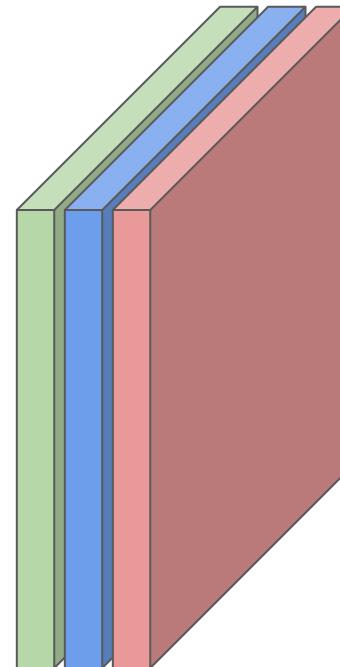
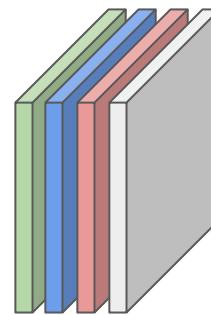
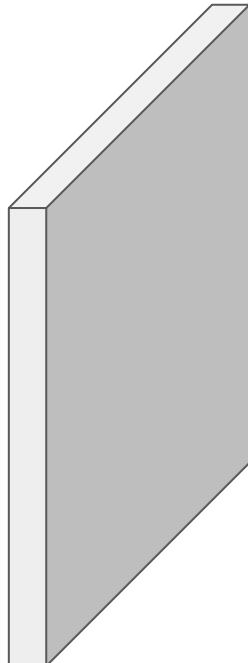
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



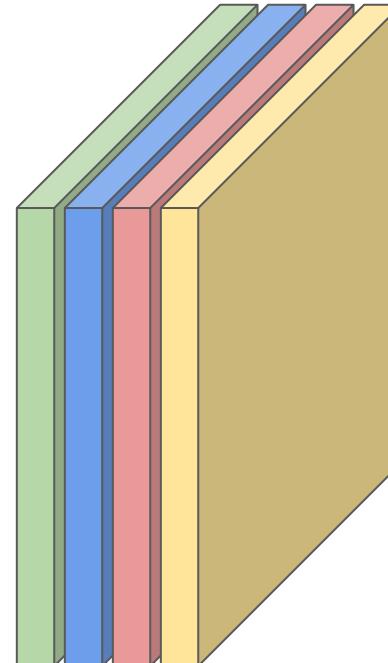
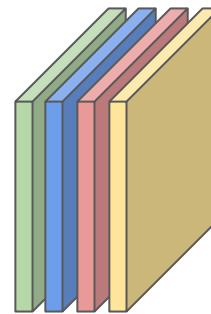
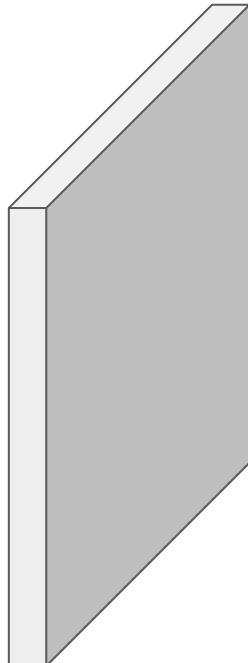
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



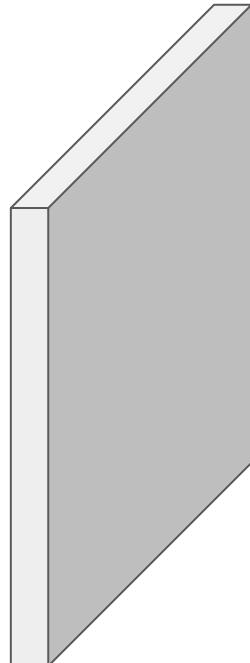
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



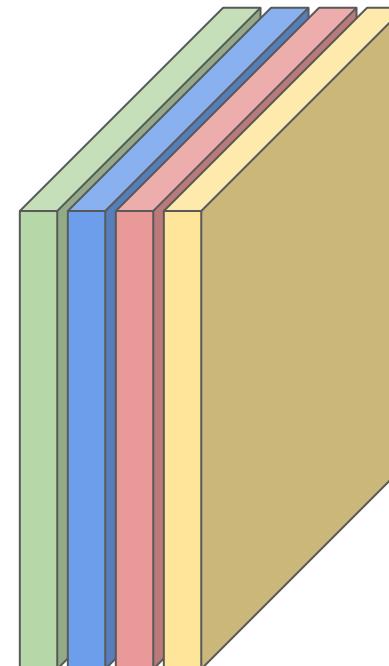
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



$5 \times 5 \times 4$

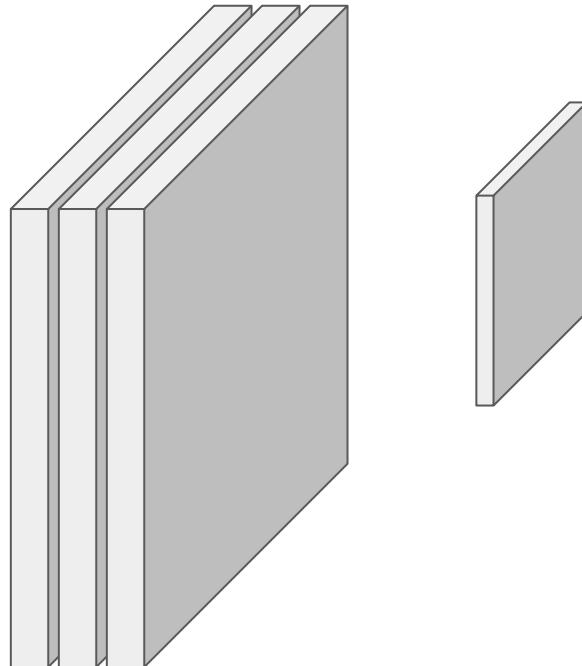
$W \times H \times 1$



$(W-4) \times (H-4) \times 4$

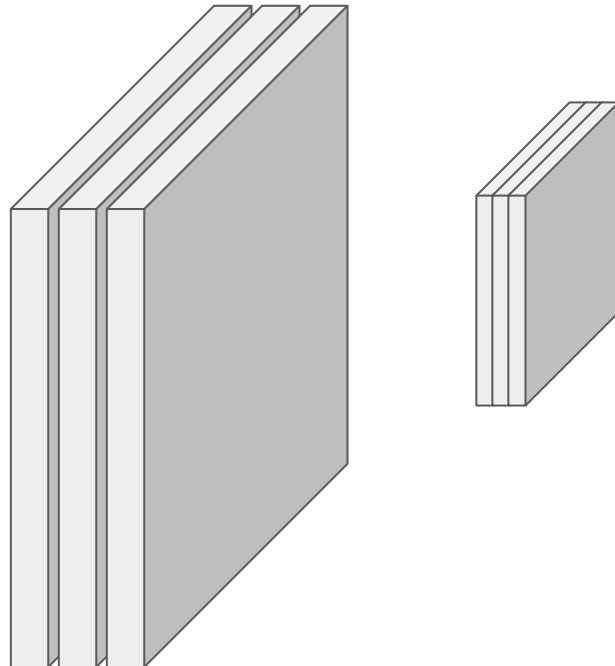
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



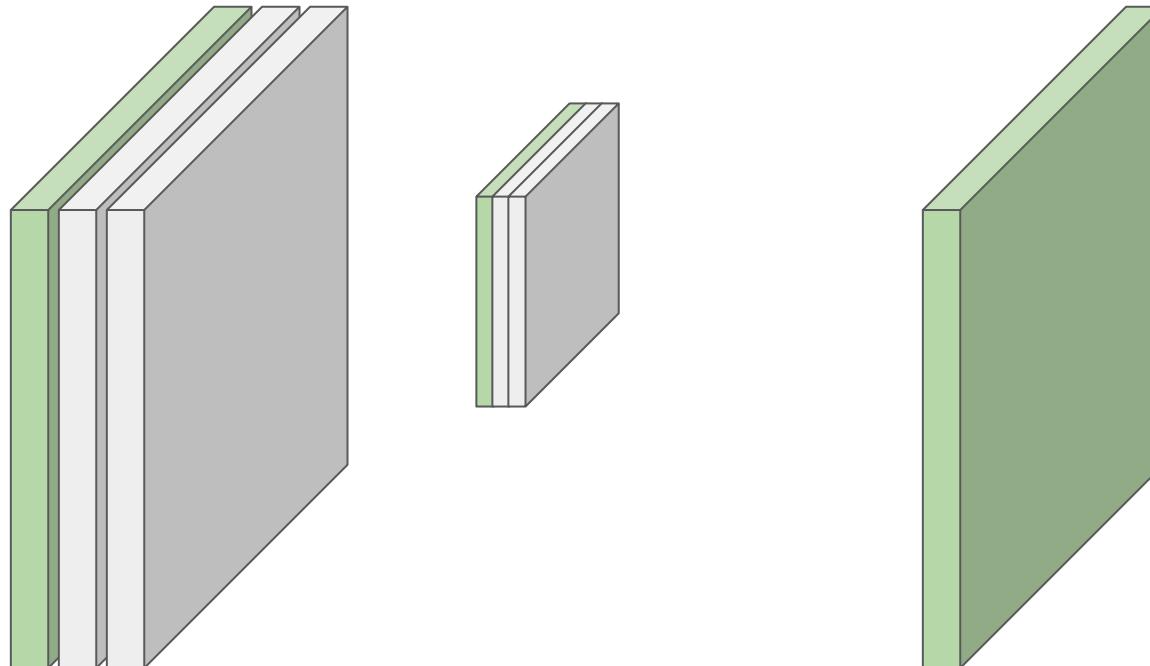
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



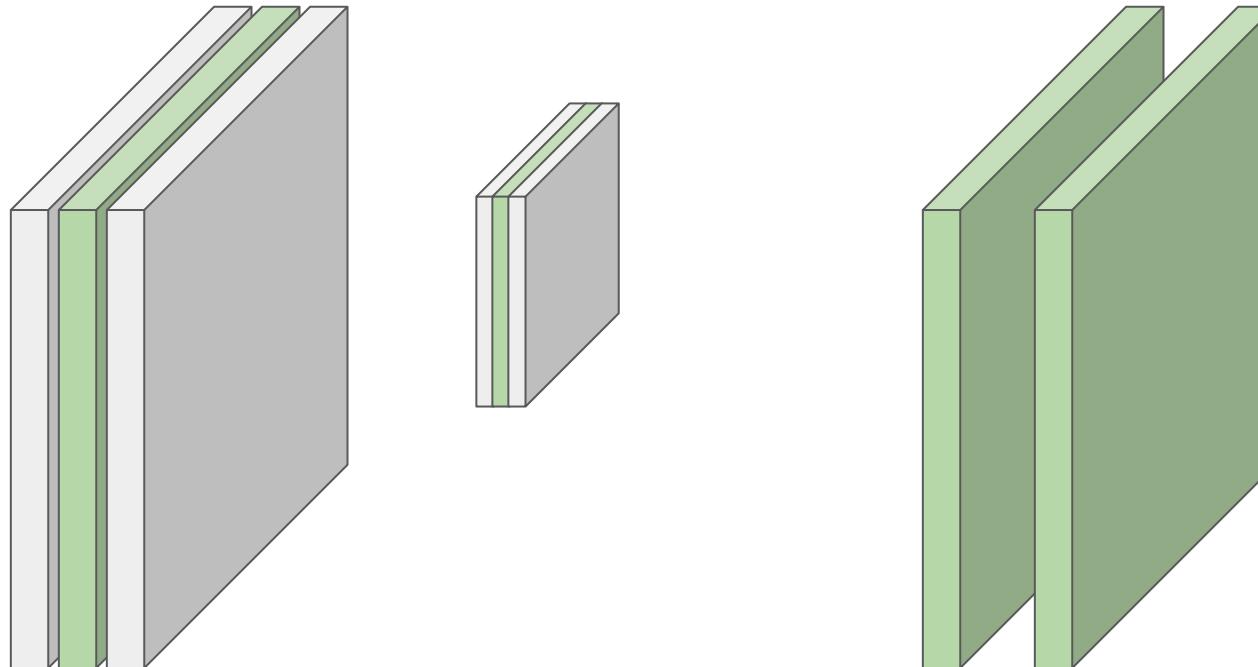
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



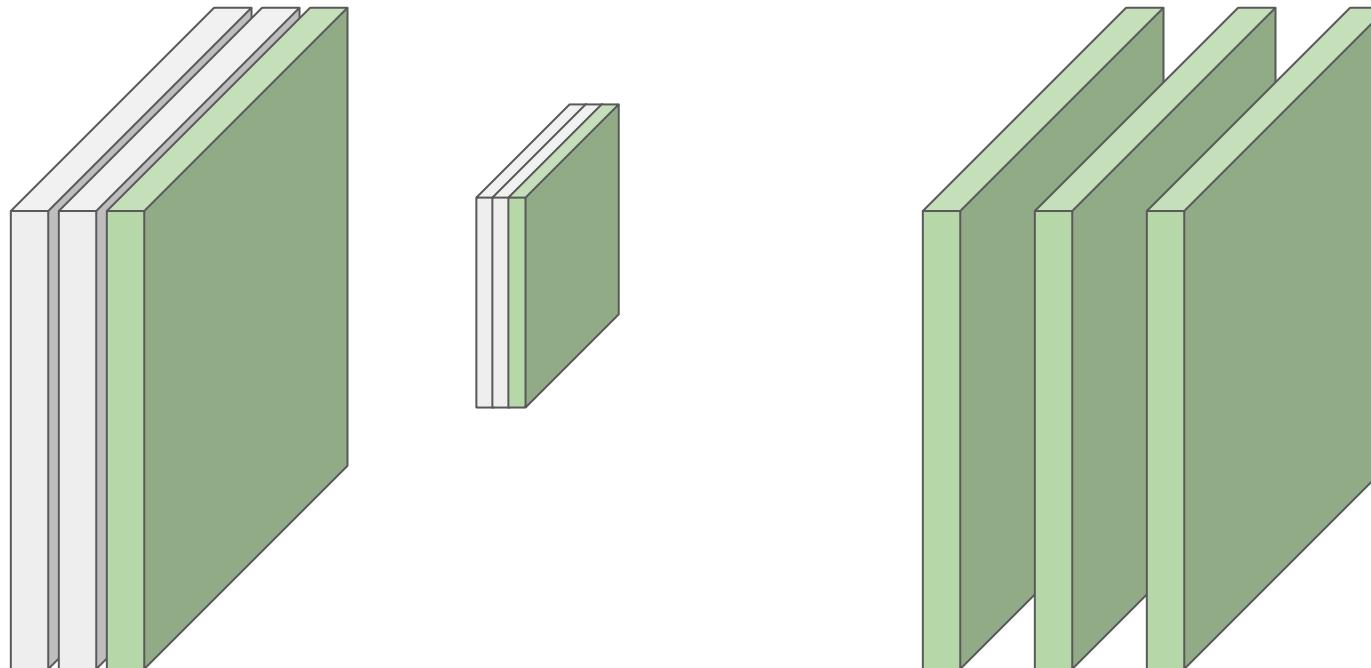
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



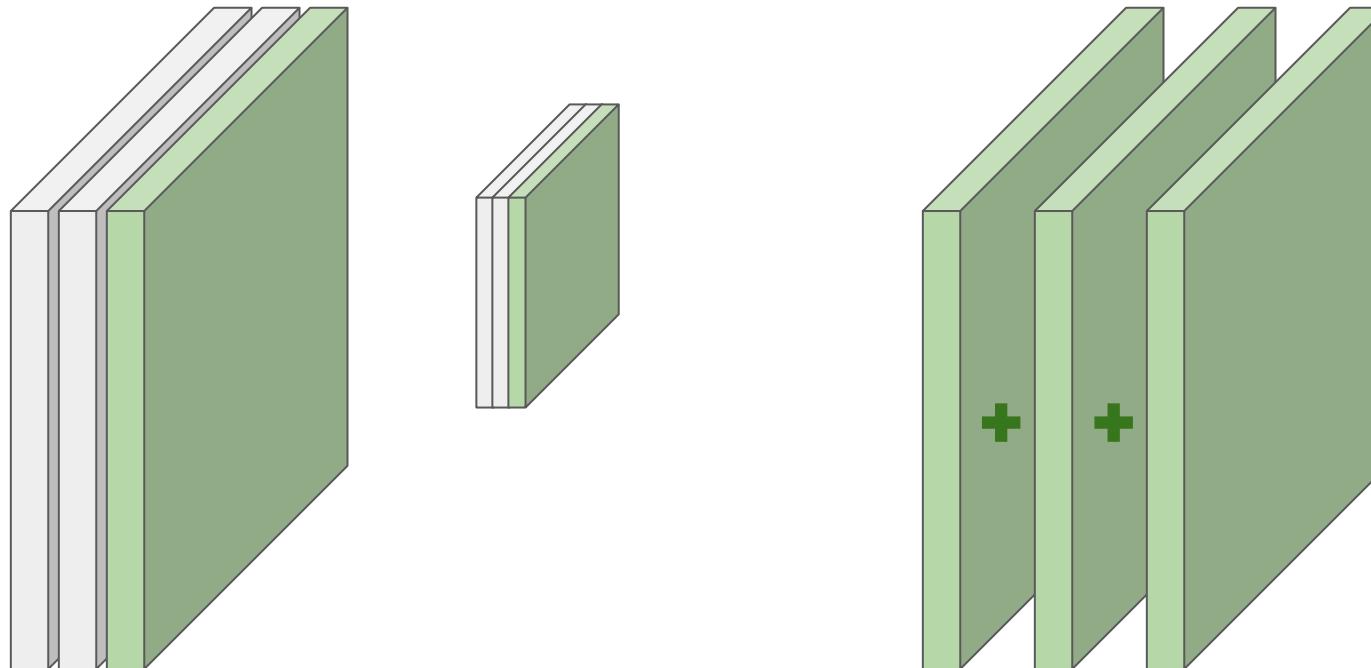
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



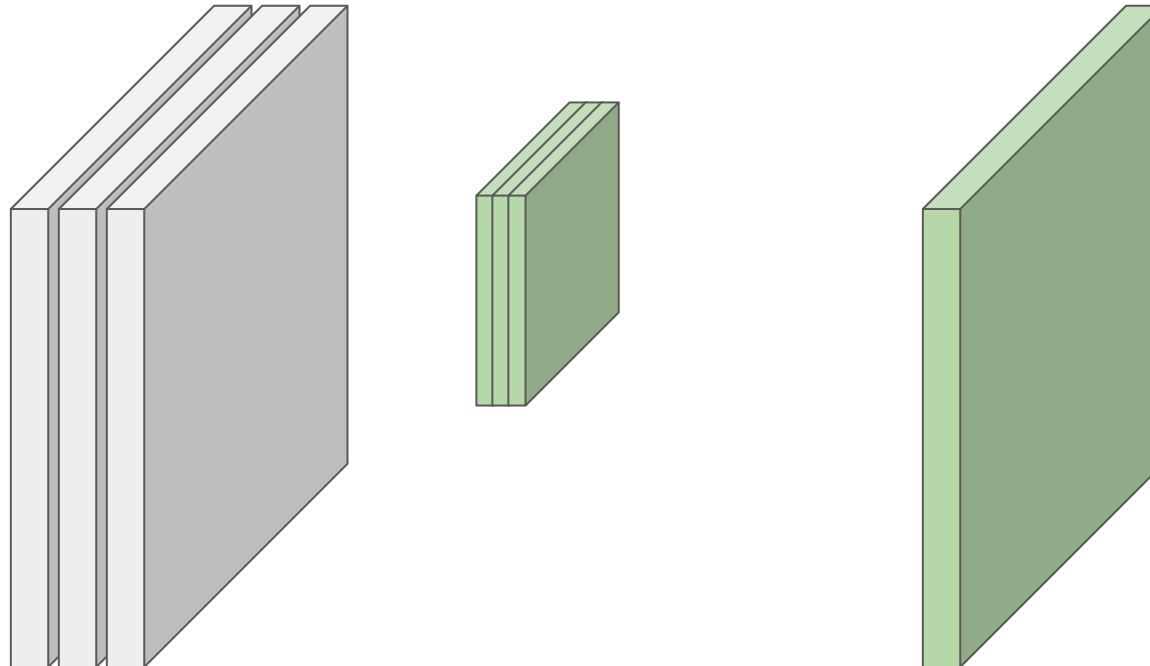
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



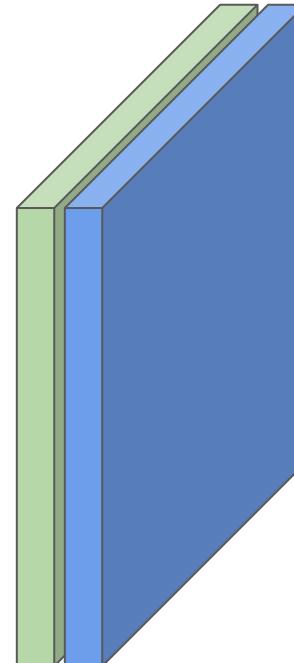
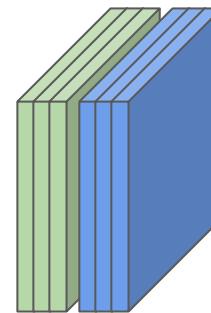
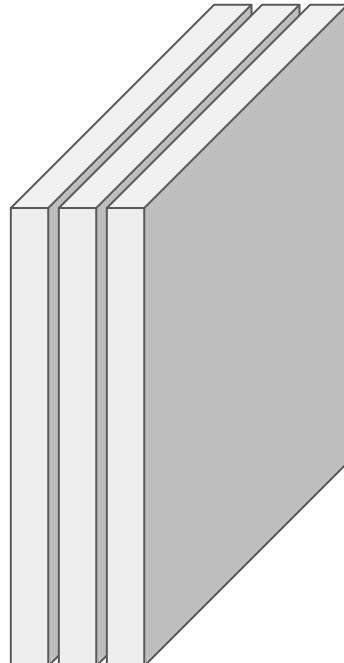
Свёртки (convolutions)

Многоканальные



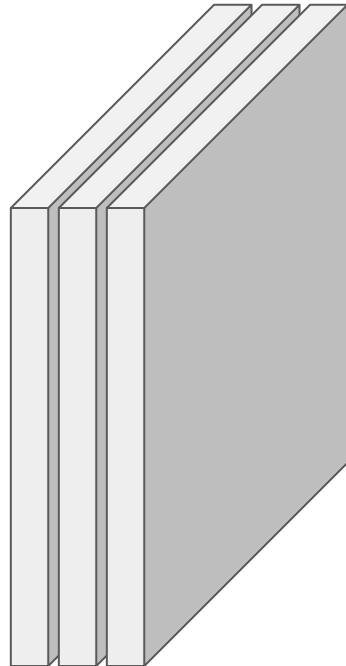
Свёртки (convolutions)

Многоканальные

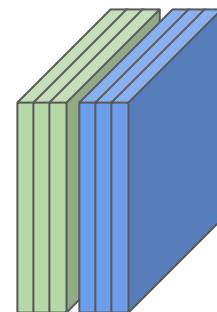


Свёртки (convolutions)

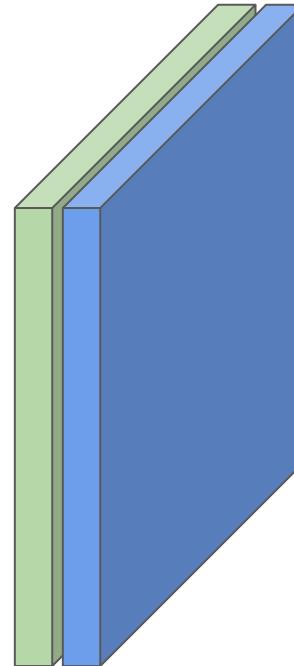
Многоканальные



$W \times H \times 3$

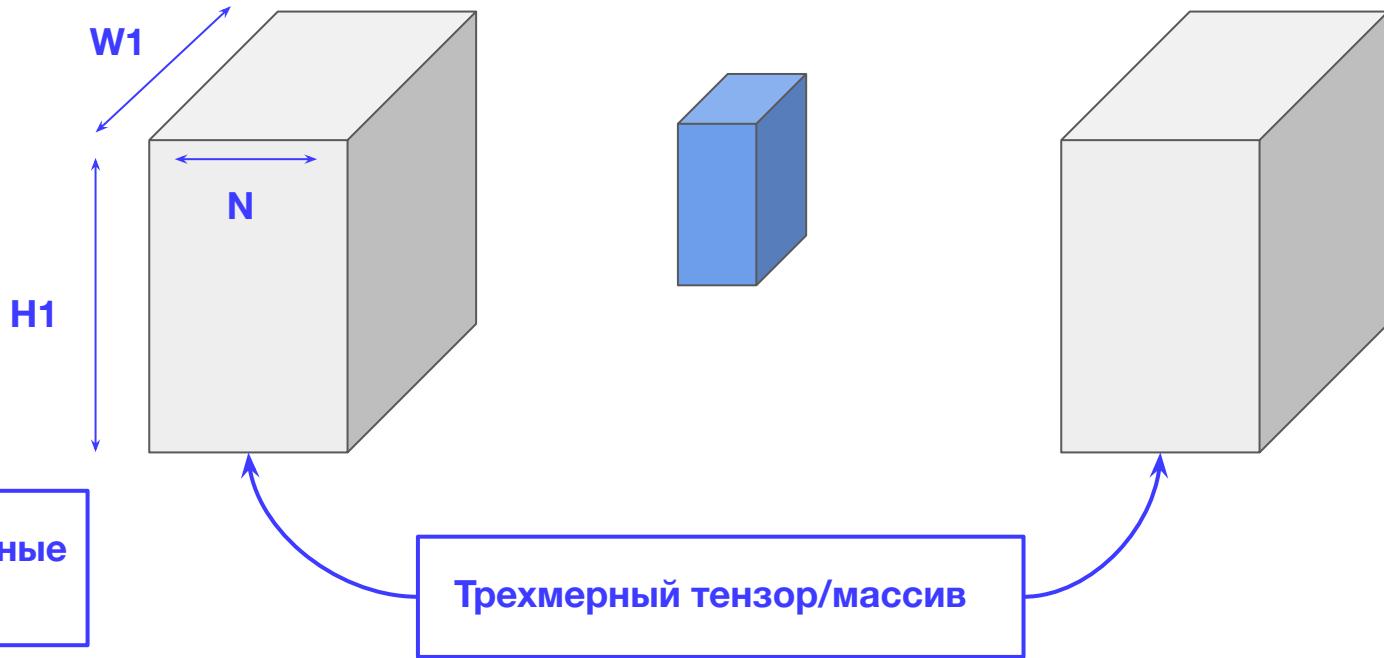


$5 \times 5 \times 3 \times 2$

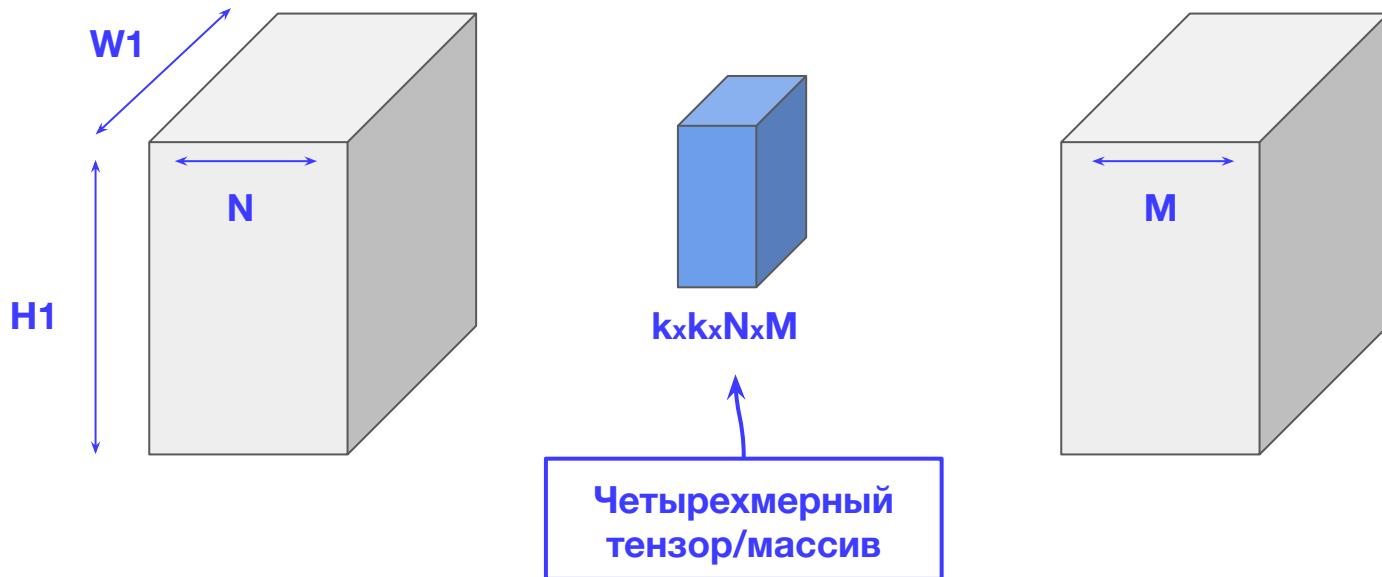


$(W-4) \times (H-4) \times 2$

Количество каналов,
признаков, карт признаков



- (k, k) - размер фильтра
- N - количество входных каналов
- M - количество выходных каналов



Итог

- Мы перешли от одноканальной операции свертки к многоканальной (а именно такие используются в нейронных сетях)
- Пусть вас не пугают такие слова как четырехмерные тензоры
- Свертка -- математическая операция, а ядро свертки -- “мешок” с числами
- Но если эти числа подобраны правильно, то он способен на многое
 - Подбирать мы конечно будем не вручную :)
- Мы с вами обязательно с этим разберемся. А сейчас давайте перейдем к демонстрации использования свертки в Tensorflow.

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Сверточный слой в Keras

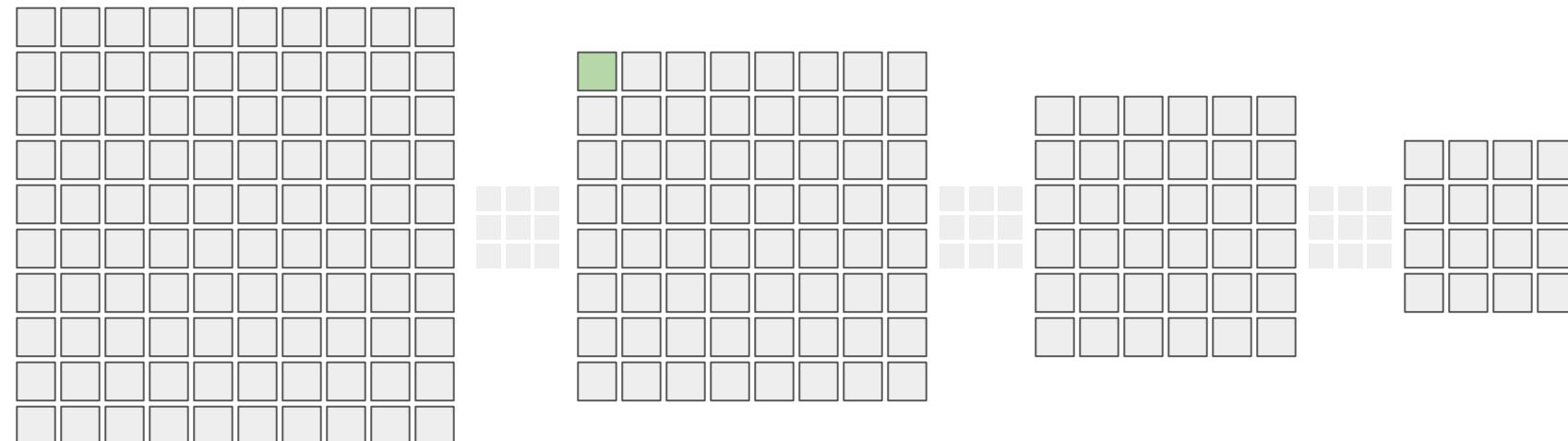
Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Рецептивное поле

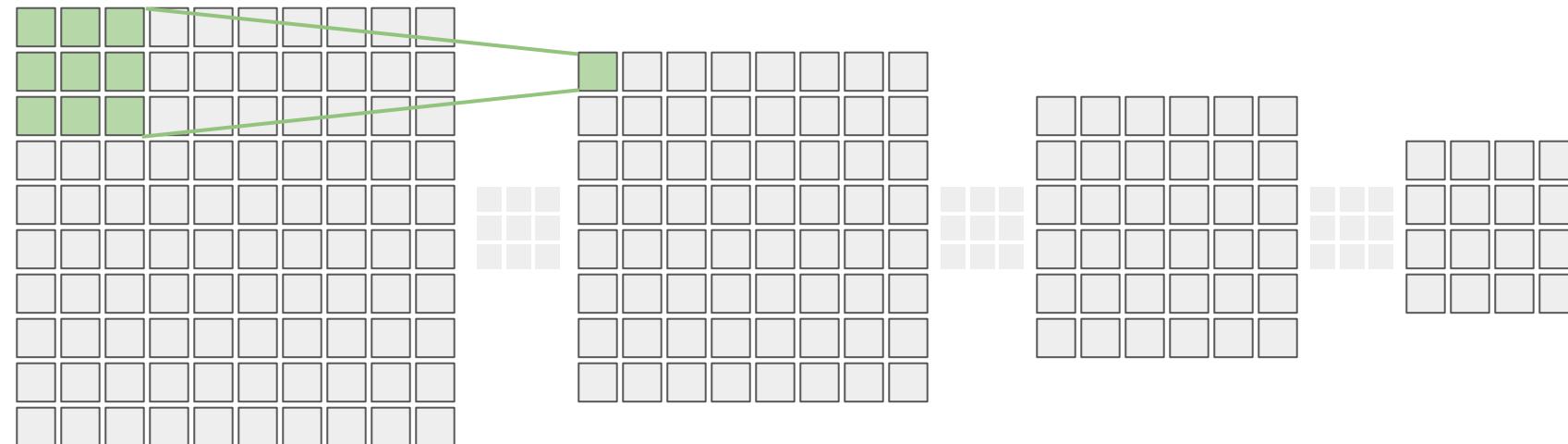
Свертки

- Знаем что такое операция свертки
- Поняли, как она обобщается на многомерный случай
- Увидели как определять сверточный слой Tensorflow.
- **Следующий шаг** перед построением первой сверточной сети -- понять, что происходит, если к исходному изображению применить несколько сверток -- одну за другой.

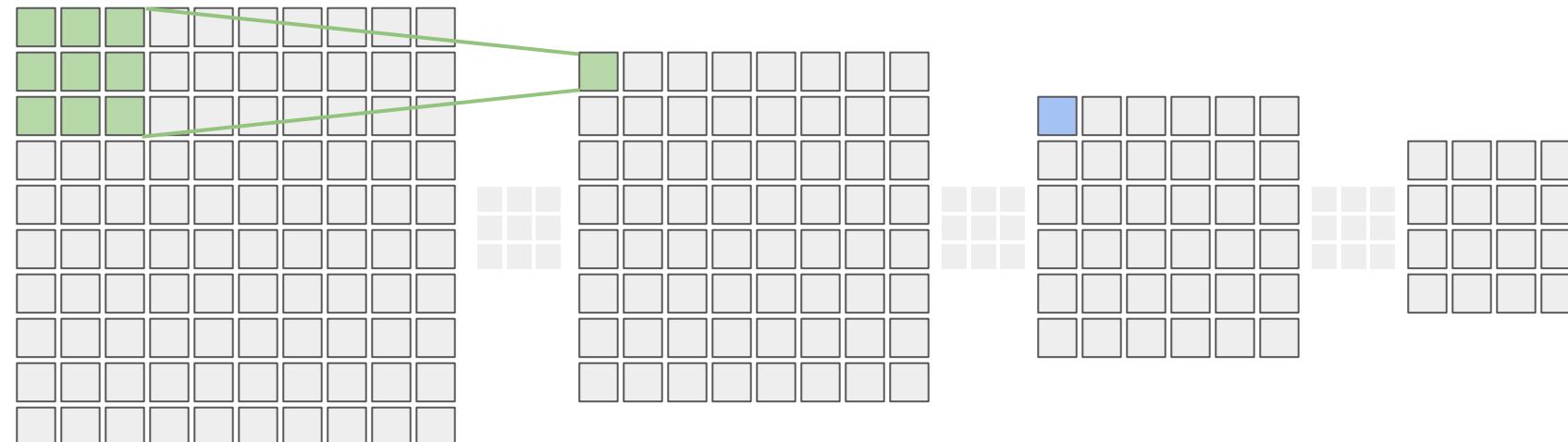
Receptive field



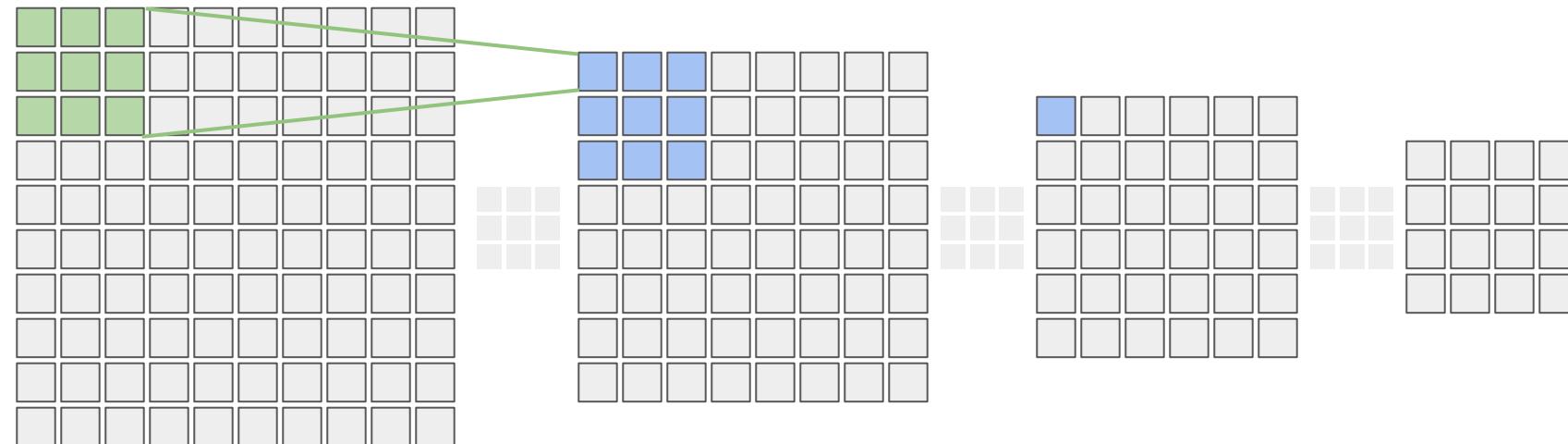
Receptive field



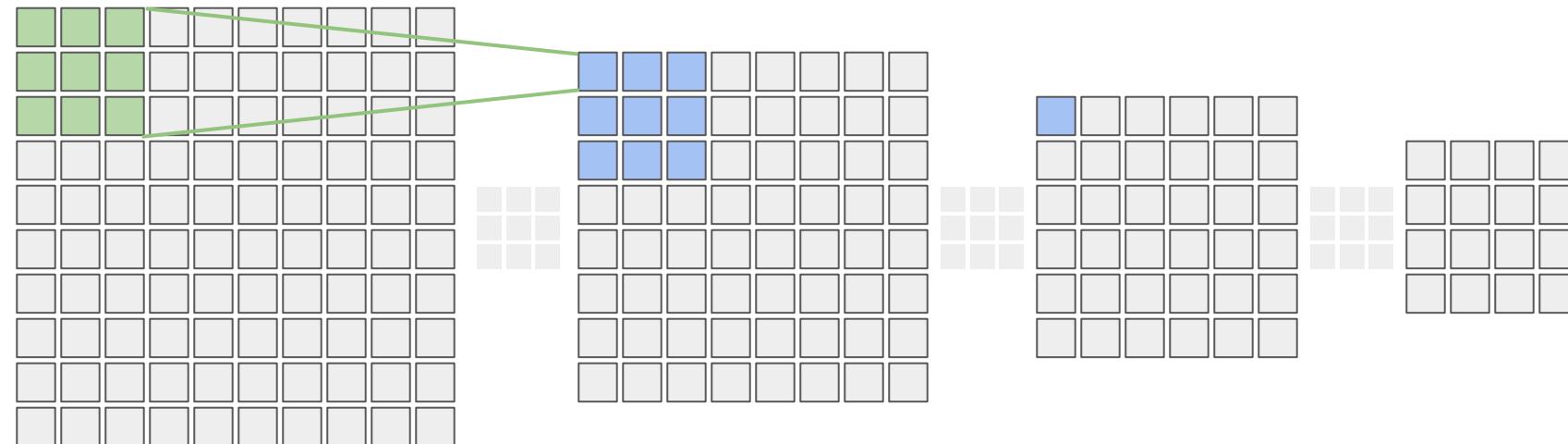
Receptive field



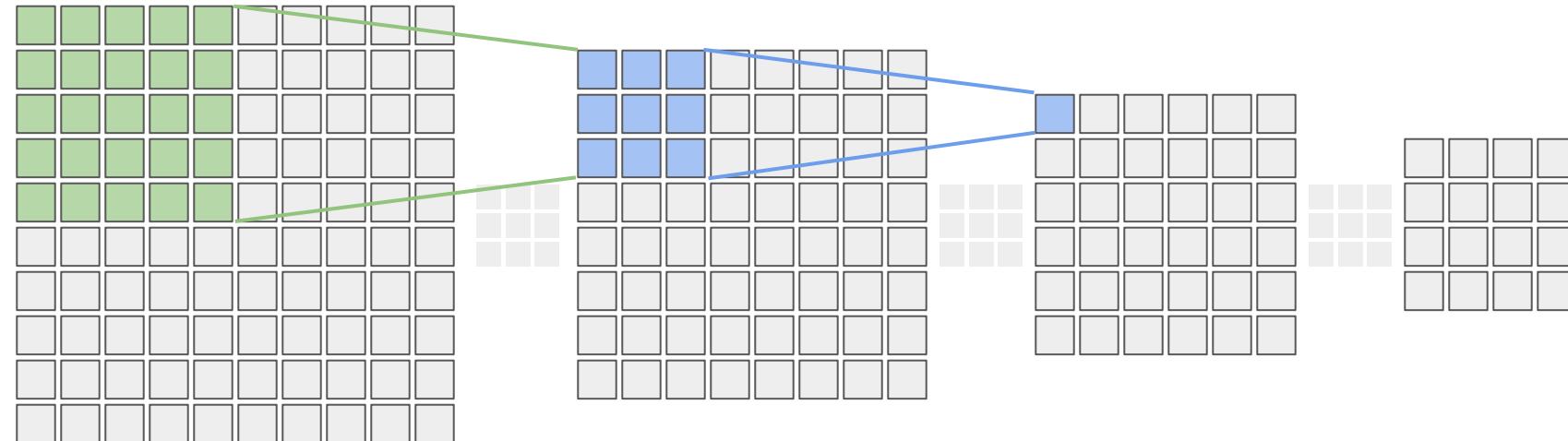
Receptive field



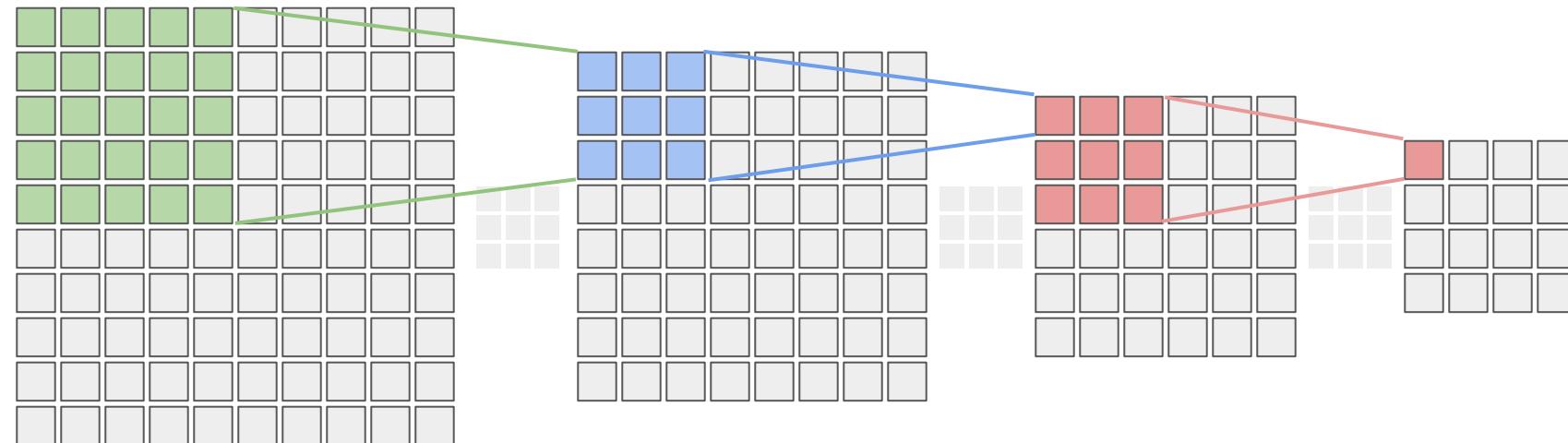
Receptive field



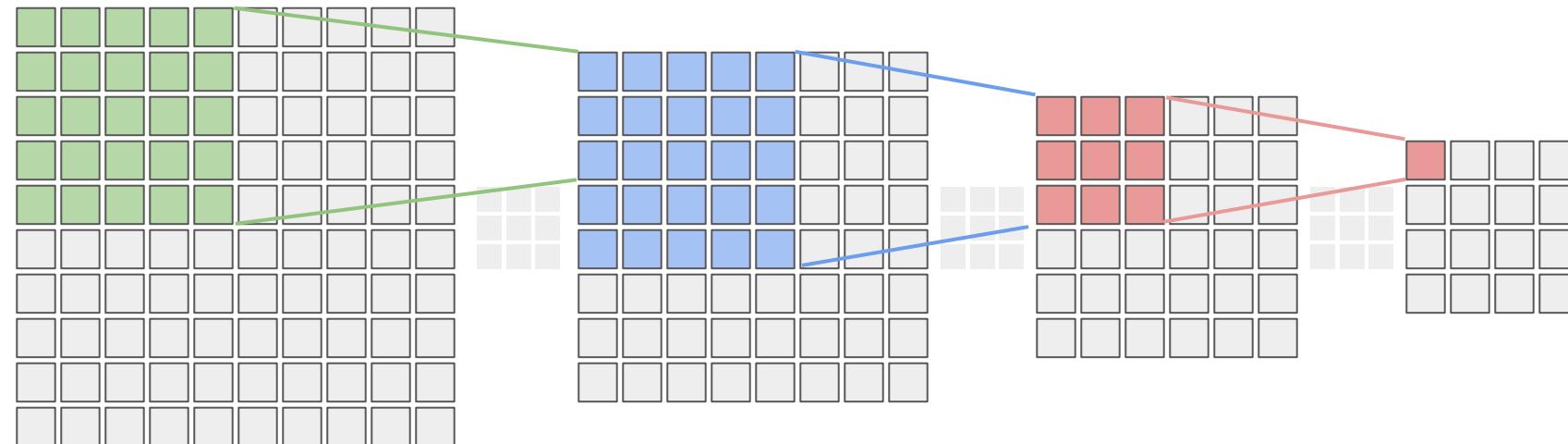
Receptive field



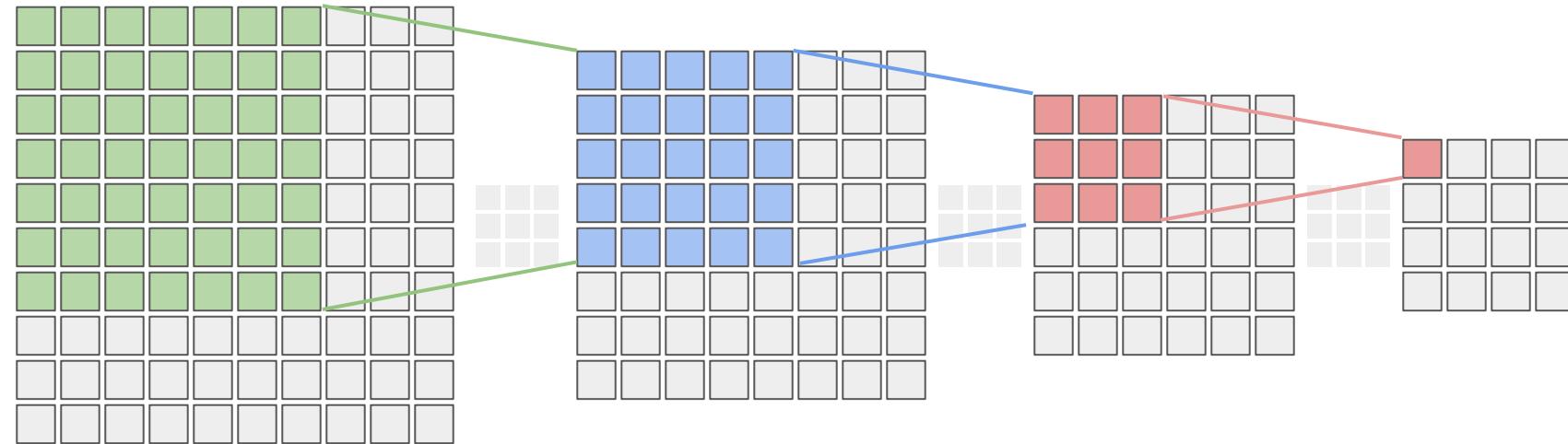
Receptive field



Receptive field

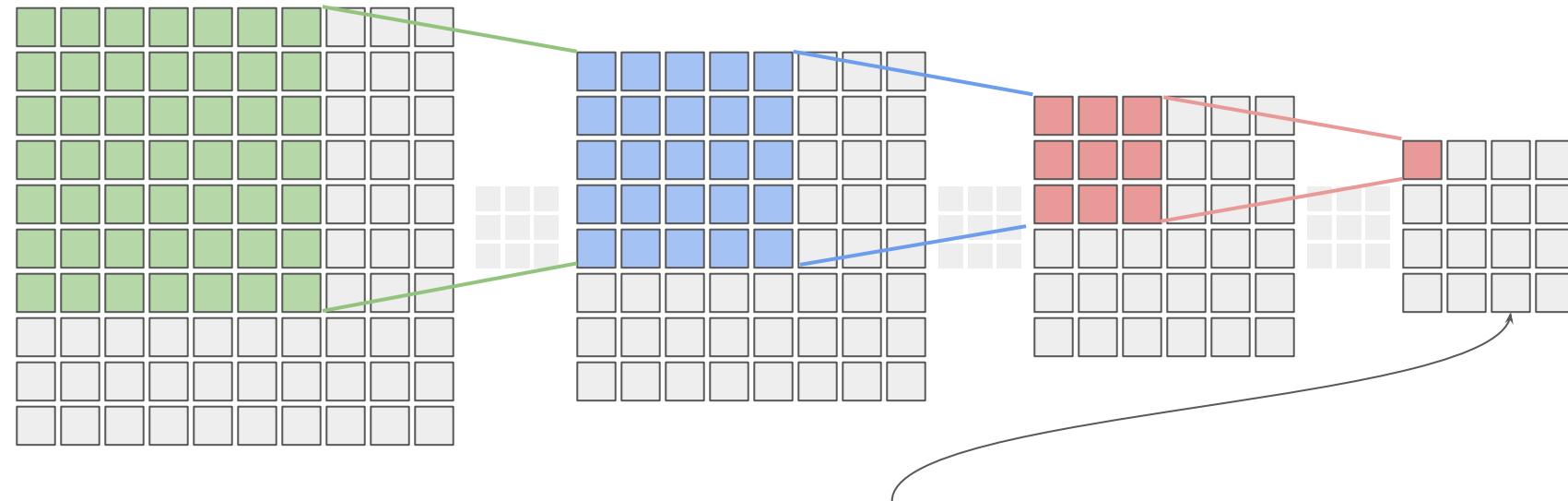


Receptive field



Conv(3,3) + Conv(3,3) + Conv(3,3) -> (7,7)

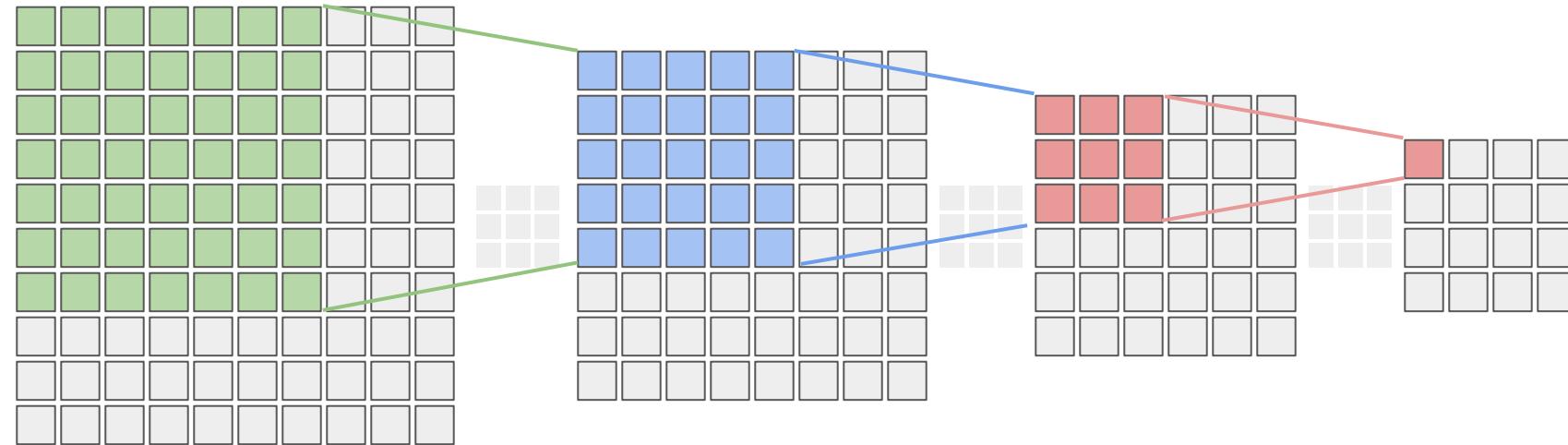
Receptive field



Подсчитаны признаки, занимающие квадраты 7×7 пикселей

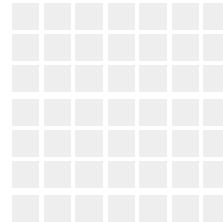
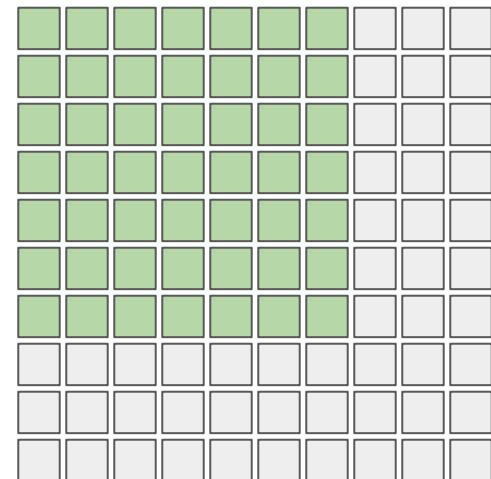
- Например “глаза как у кошки”
- Но еще не голова и не лапки ..

Receptive field

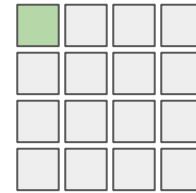


Conv(3,3) + Conv(3,3) + Conv(3,3) -> (7,7)
Conv(7,7) -> (7,7) ?

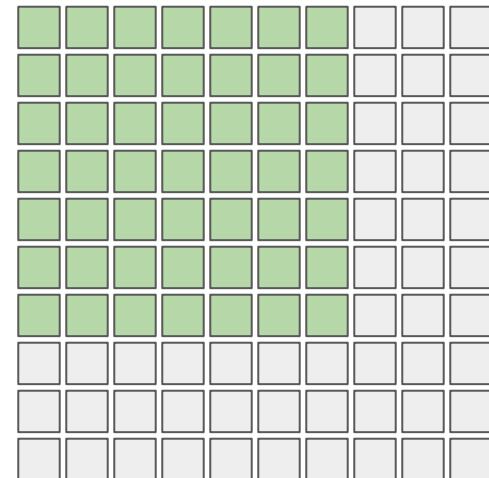
Receptive field



7x7



Receptive field

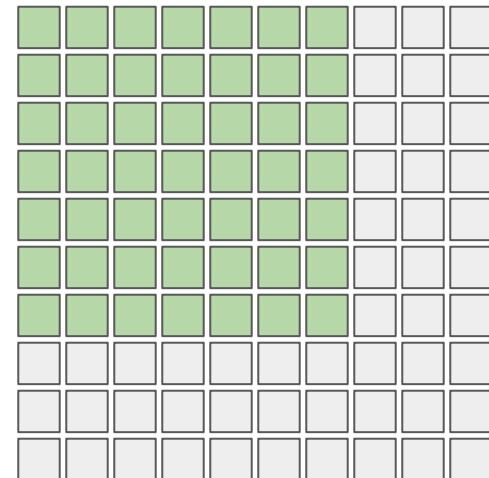


7x7

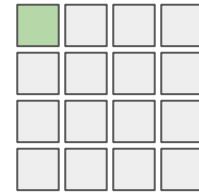


Количество параметров для трех 3x3 – 27
Количество параметров для 7x7 – 49

Receptive field

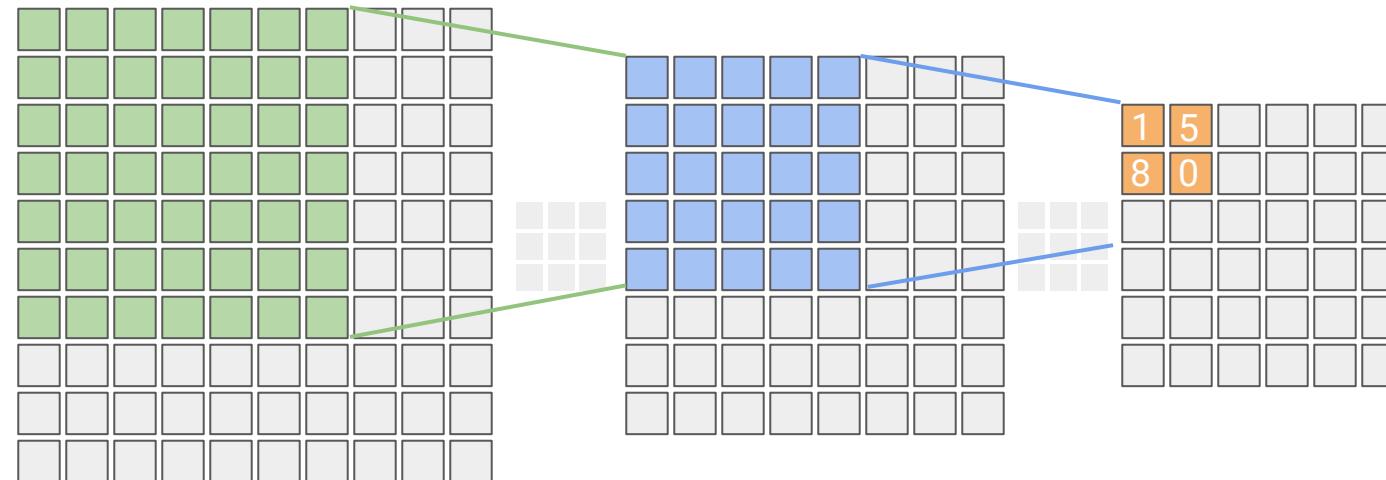


7x7

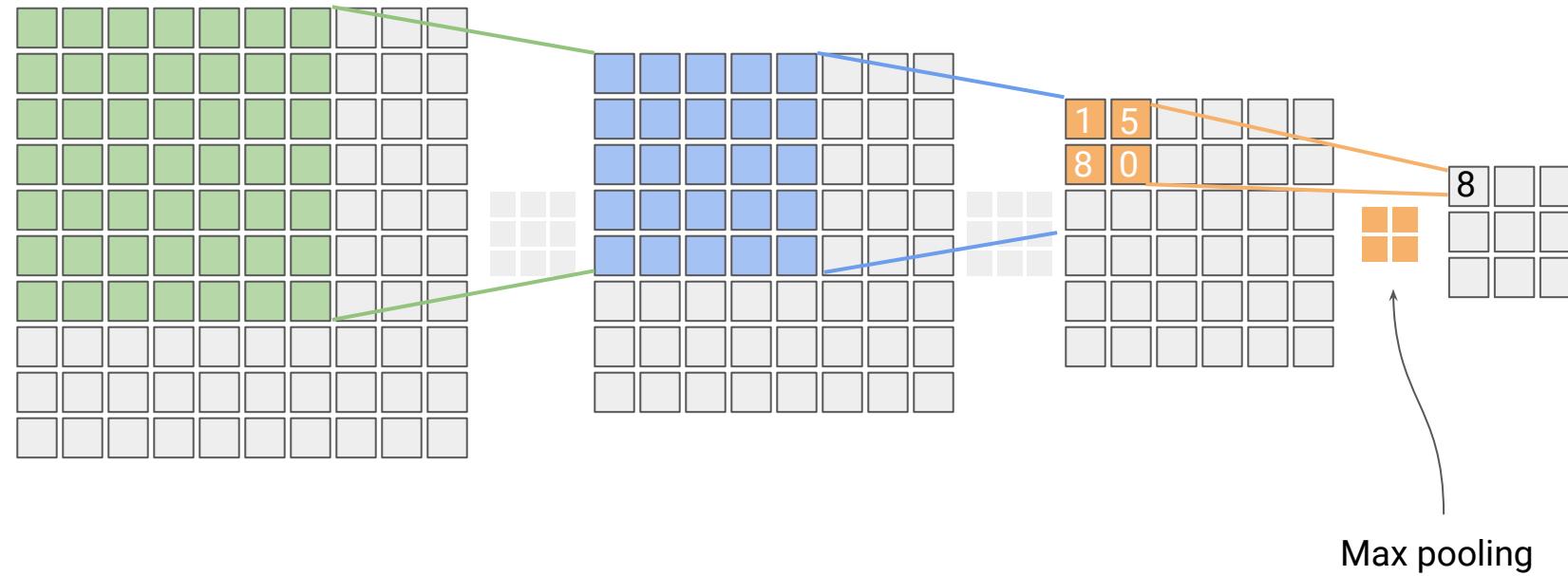


Как сделать *receptive field* еще больше?

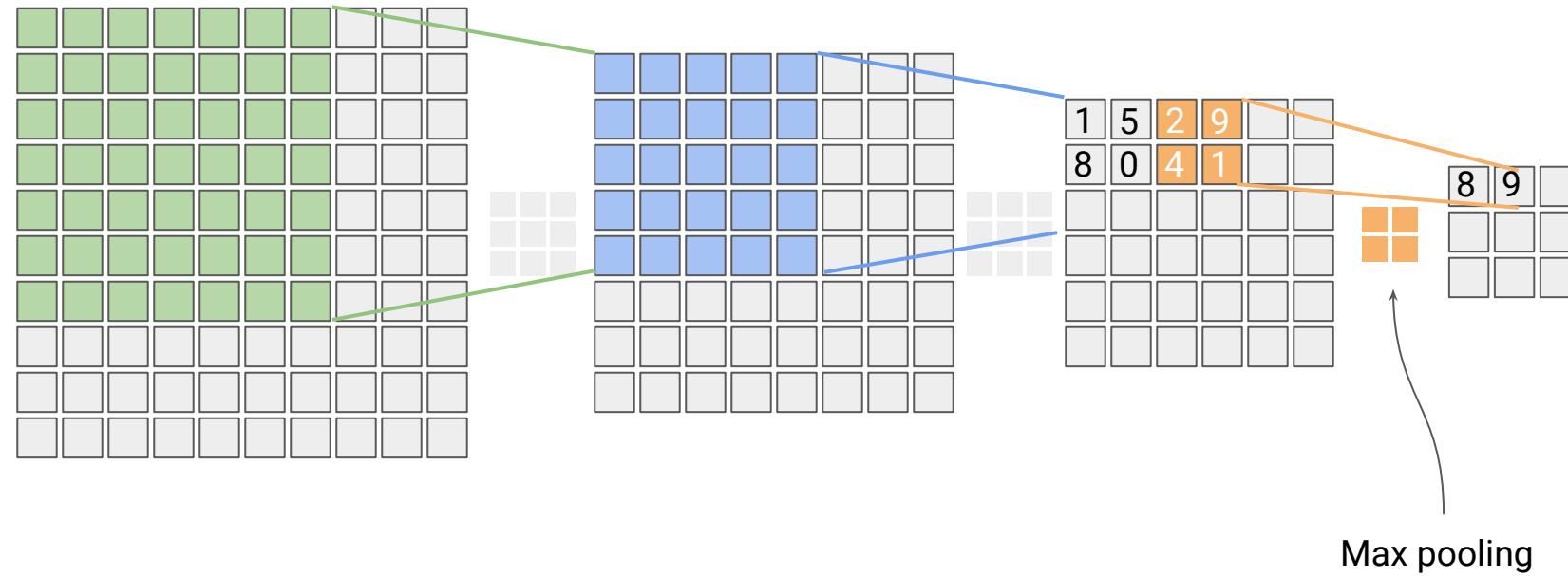
Receptive field



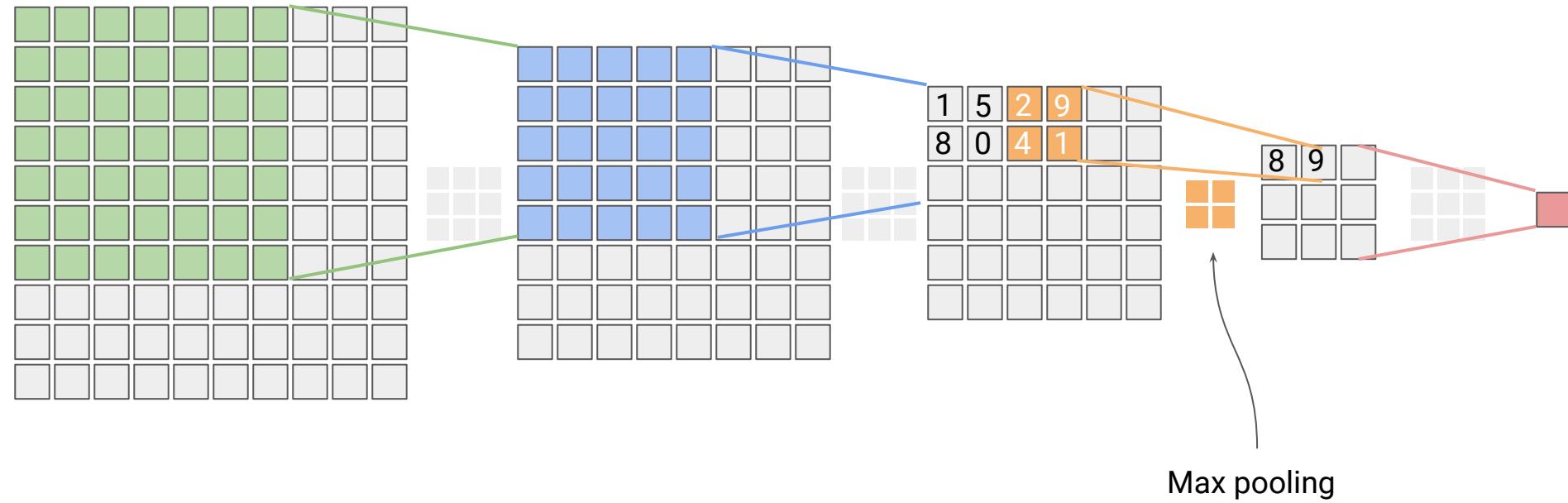
Receptive field



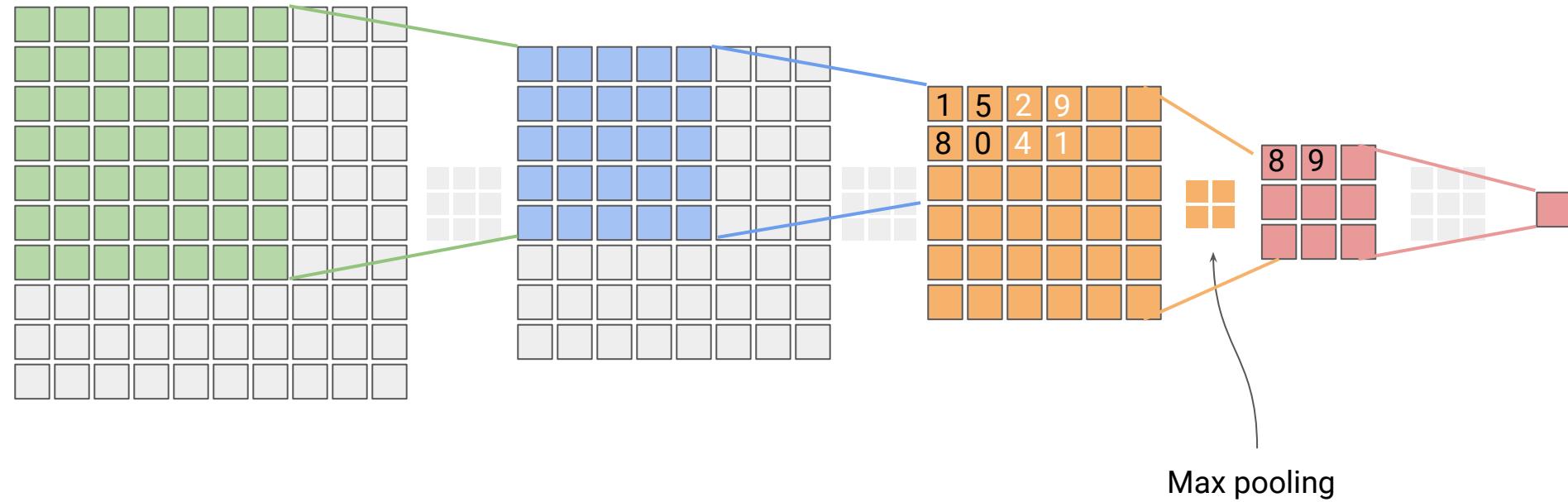
Receptive field



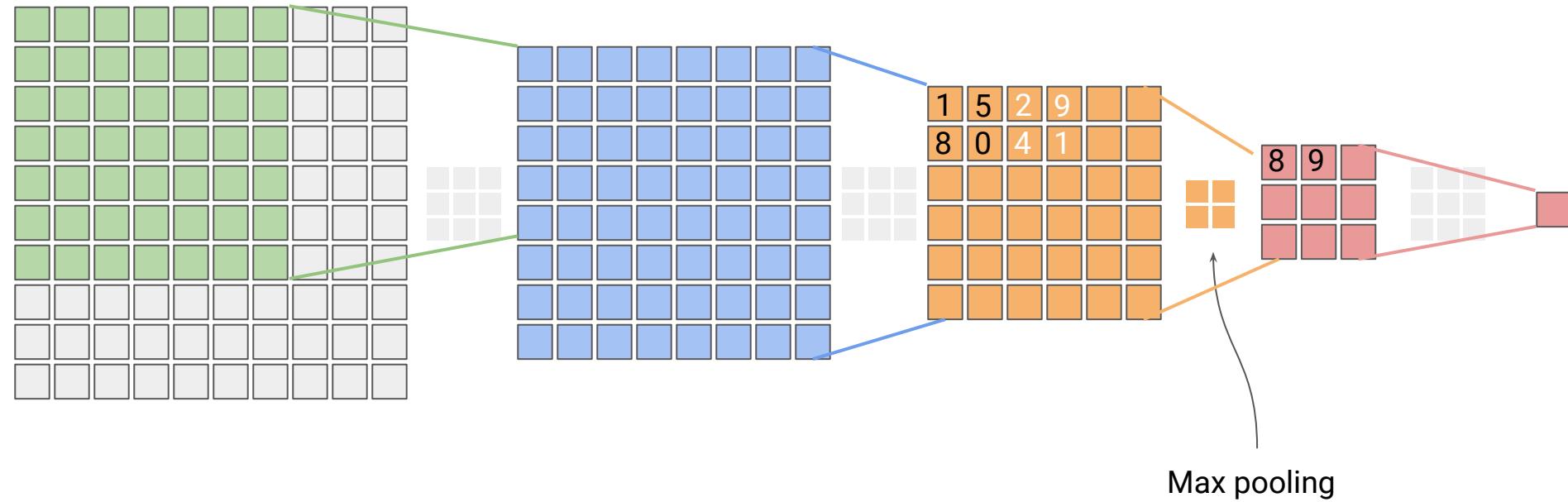
Receptive field



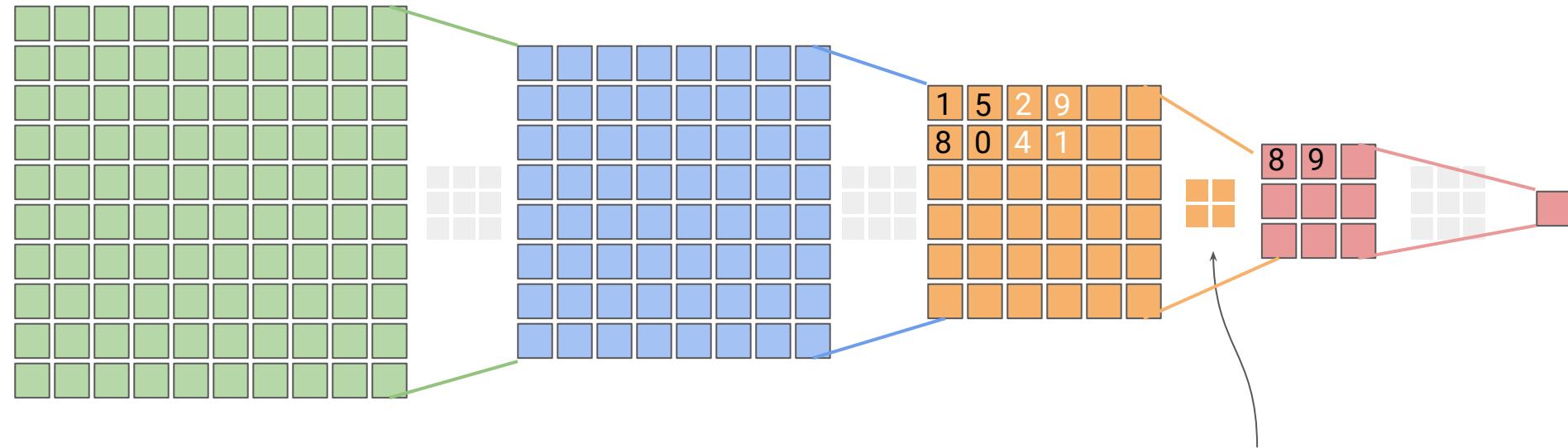
Receptive field



Receptive field



Receptive field

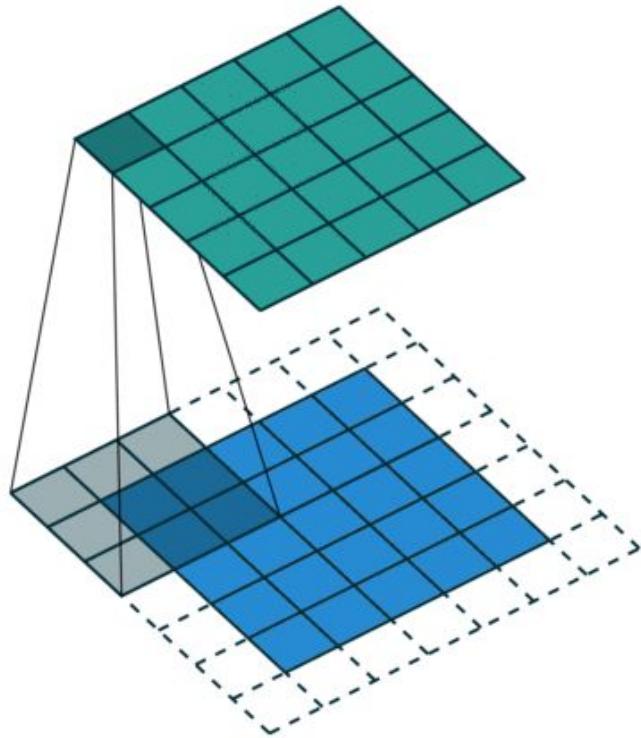


Conv(3,3) + Conv(3,3) + MaxPool(2,2) + Conv(3,3) -> (10,10)

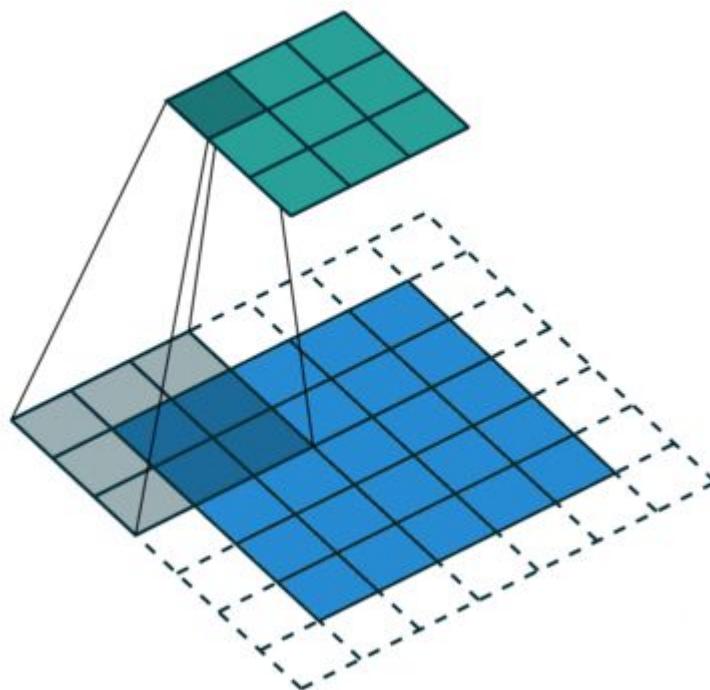
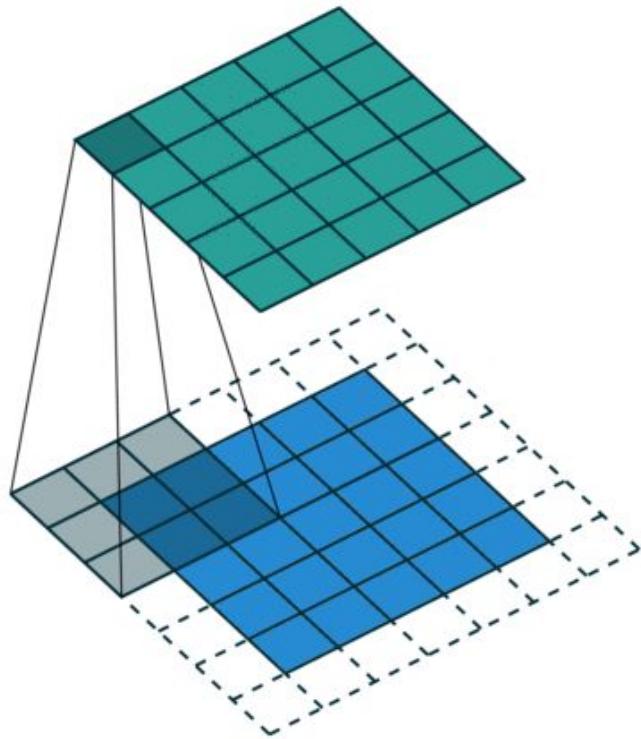
MaxPool -- не имеет обучаемых параметров

Max pooling

Stride



Stride



Итог

- Узнали про рецептивное поле
- Как используя несколько операций сверток его увеличивать, а значит -- дать сети возможность выучить более масштабные признаки
- Узнали про новый слой -- MaxPooling
- А сейчас узнаем как сверточную нейронную сеть реализовать на Tensorflow

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Сверточная сеть в Keras

Свёрточные нейросети для задачи классификации изображений. Часть 1.

Input pipeline