ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт дополнительного образования

ВЫСШАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНЦЕНТРАТ В ПРОЦЕССЕ ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ

по программе профессиональной переподготовки:
«Анализ данных на Python»

Выполнил: Клемятов Александр Анатольевич
Руководитель: к.т.н. Семендяев Родион Юрьевич

Санкт-Петербург, 2026

Цель работы и предмет исследования

изучение влияния содержания анализируемых элементов в руде и качества концентрата по элементу 1 - на их извлечение в концентрат.

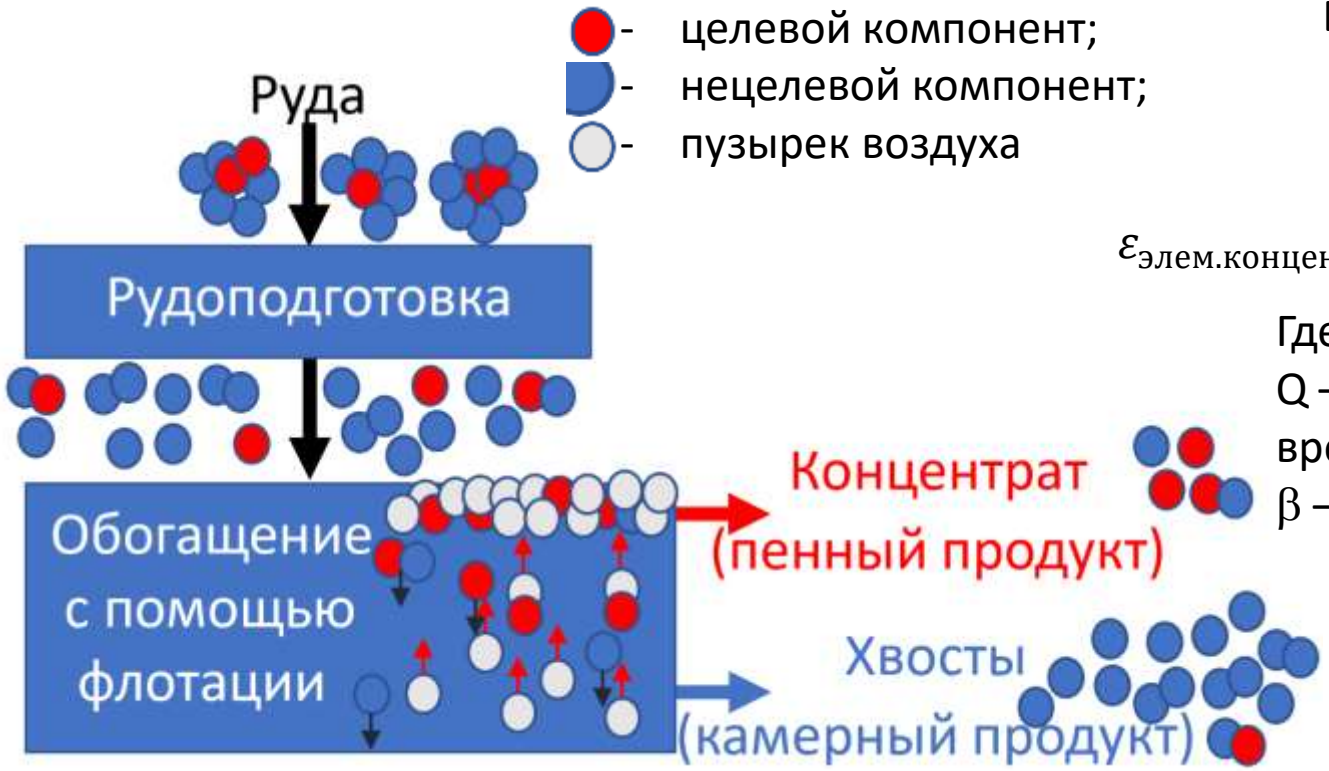
С учетом особенностей технологического процесса и состава имеющихся данных цели исследования будут конкретизированы, а также сформулированы задачи, решение которых необходимо для достижения целей.

Объект исследования

действующая обогатительная фабрика.

Основной процесс обогащения руды на рассматриваемом объекте – флотация.

Что такое обогащение и основные показатели, характеризующие процесс



Выход продукта: $\gamma_{\text{концентрат}} = \frac{Q_{\text{концентрат}}}{Q_{\text{руда}}} \cdot 100, \%$

Извлечение элемента в продукт:

$$\varepsilon_{\text{элем.концентрат}} = \frac{Q_{\text{элем.концентрат}}}{Q_{\text{элем.руда}}} \cdot 100 = \frac{\gamma_{\text{концентрат}} \cdot \beta_{\text{элем.концентрат}}}{\beta_{\text{элем.руда}}}, \%$$

Где:

Q – вес получаемого продукта или элемента за единицу времени, т/сут;

β – содержание элемента, %

Материальный баланс:

$$Q_{\text{руда}} = Q_{\text{концентрат}} + Q_{\text{хвосты}}$$

$$Q_{\text{элемент руда}} = Q_{\text{элемнт концентрат}} + Q_{\text{элемент хвосты}}$$

$$\gamma_{\text{элем. руда}} = \gamma_{\text{элем. концентрат}} + \gamma_{\text{элем. хвосты}}$$

$$\varepsilon_{\text{элем. руда}} = \varepsilon_{\text{элем.концентрат}} + \varepsilon_{\text{элем.хвосты}}$$

$$\gamma_{\text{элем.руда}} \cdot \beta_{\text{элем.руда}} = \gamma_{\text{концентрат}} \cdot \beta_{\text{элем.концентрат}} + \gamma_{\text{хвосты}} \cdot \beta_{\text{элем.хвосты}}$$

Состав исходного массива данных

- дата;
- переработка руды суммарно по ОФ и по секциям, т/сут.;
- выход концентрата суммарно по ОФ и по секциям, %;
- содержание элемента 1 в руде и в концентрате, извлечение элемента 1 в концентрат суммарно и по секциям, %;
- содержания и извлечения элементов 2 и 3 в руде и в концентрате суммарно по ОФ, %;
- содержание элемента 4 в концентрате суммарно по ОФ, %
- содержание контрольного класса крупности после первой стадии измельчения и в хвостах по секциям, %;

С целью обезличивания набора данных для предотвращения их утечки - часть параметров была скорректирована, а контролируемые химические элементы названы по номерам от 1 до 4.

Всего 43 показателя за период 2222 суток.

Конкретизация целей и постановка задач

Постановка целей

Необходимо изучить влияние содержаний:

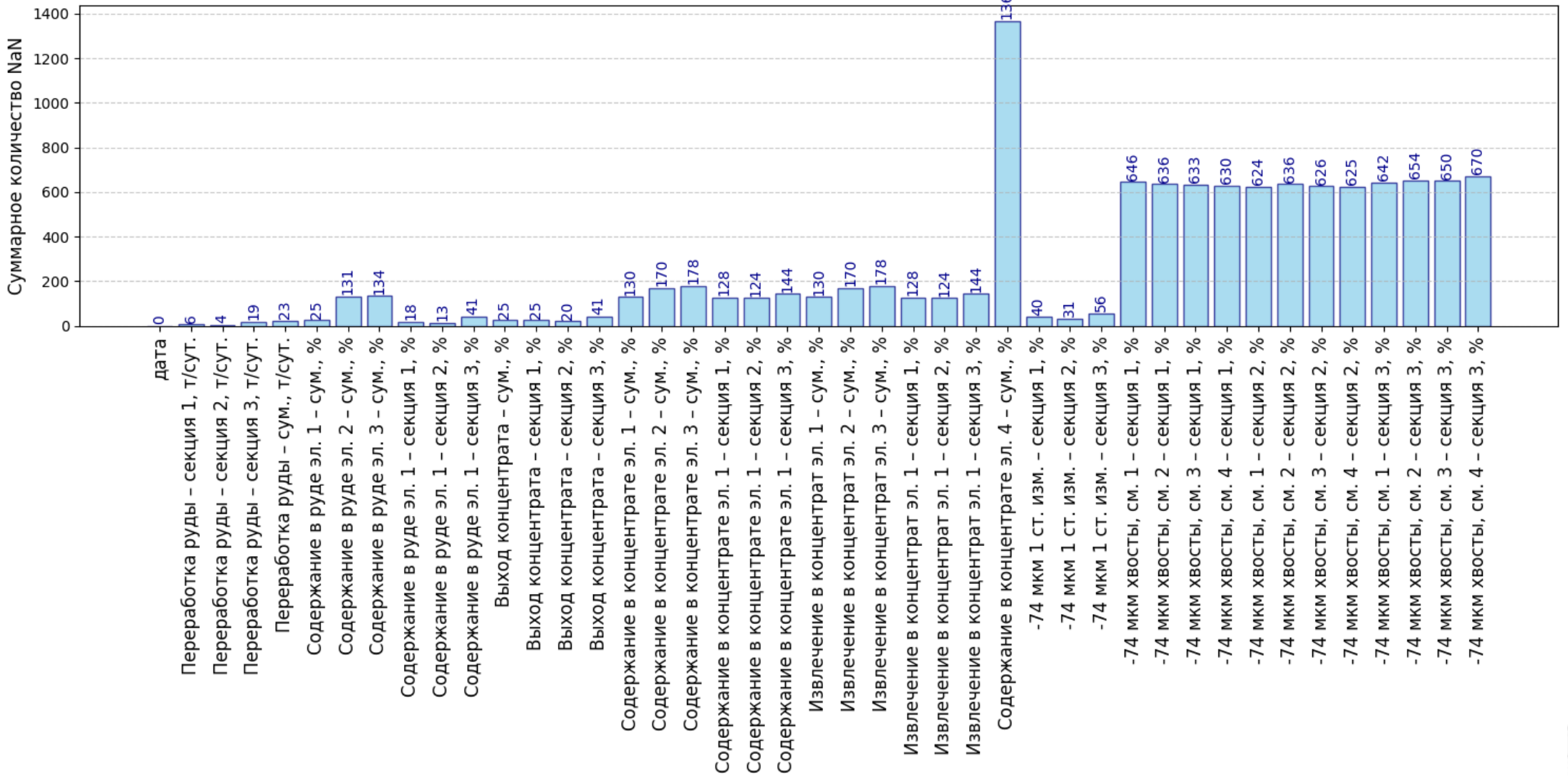
1. в концентрате элемента 1 и в руде элементов 1 и 3 на выход концентрата и извлечение в него элемента 1;
2. в руде элементов 2 и 3 на их извлечение в концентрат;
3. в концентрате элементов 1 и 3 на содержание элемента 4.

Постановка задач, необходимых для достижения целей:

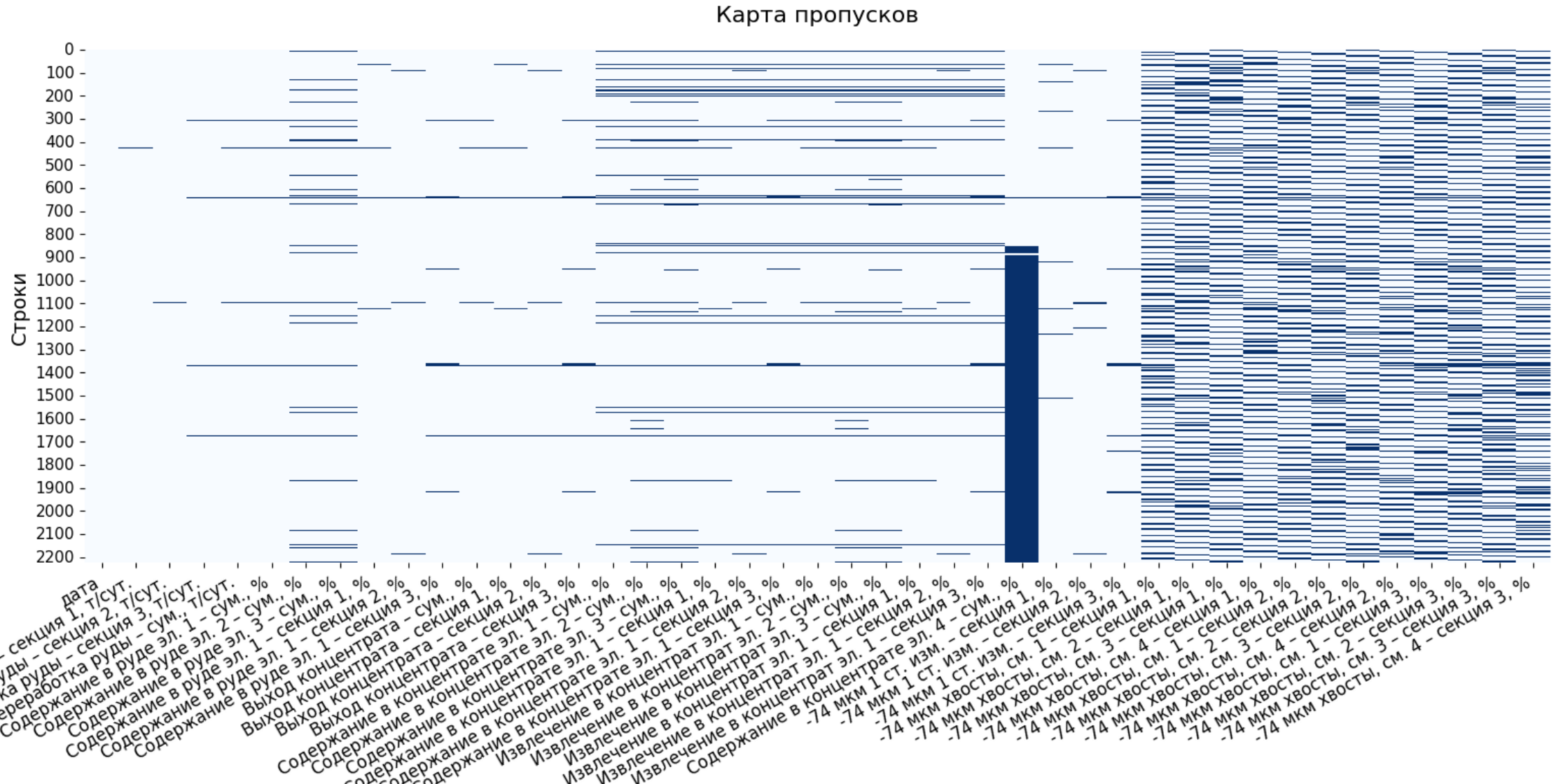
1. подготовка данных;
2. рассмотрение данных, отбор признаков и выбор таргетов;
3. подбор наилучших моделей и оптимизация их параметров;
4. создание синтетических наборов данных, предсказание таргетов, расчёт дополнительных показателей;
5. визуализация результатов и их рассмотрение.

Подготовка данные к исследованиям

Количество пропусков

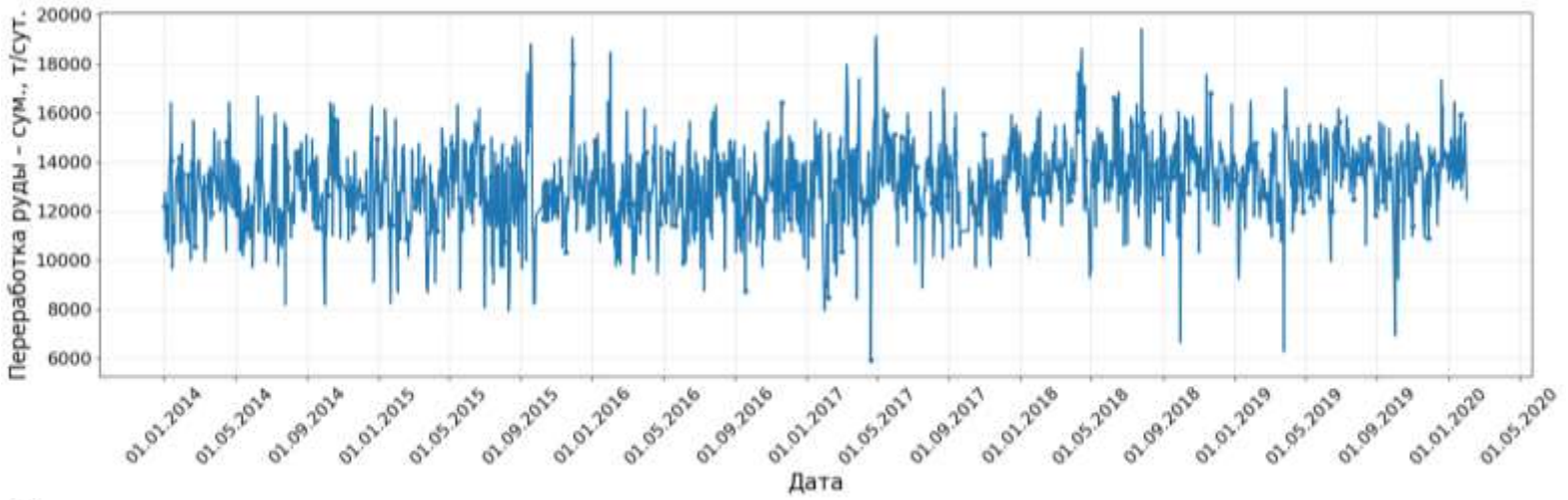


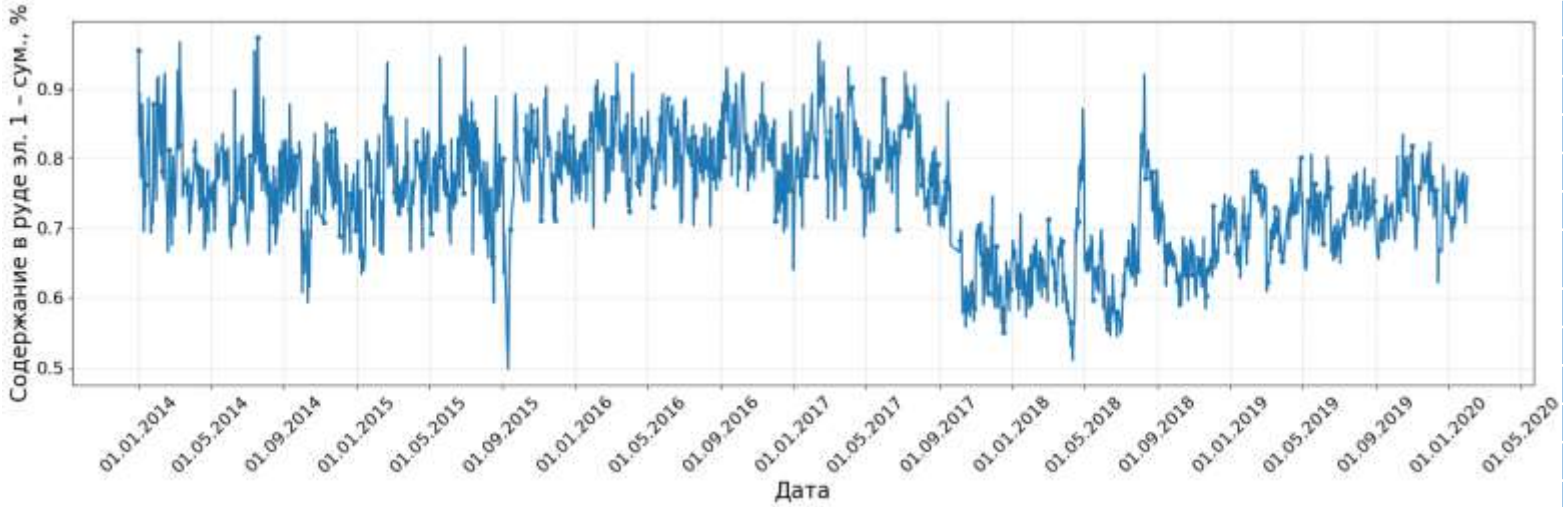
Заполнение пропусков и проверка данных



Подготовлен набор данных содержащий 2051 строку из 2222 исходных.

Взаимные связи между показателями



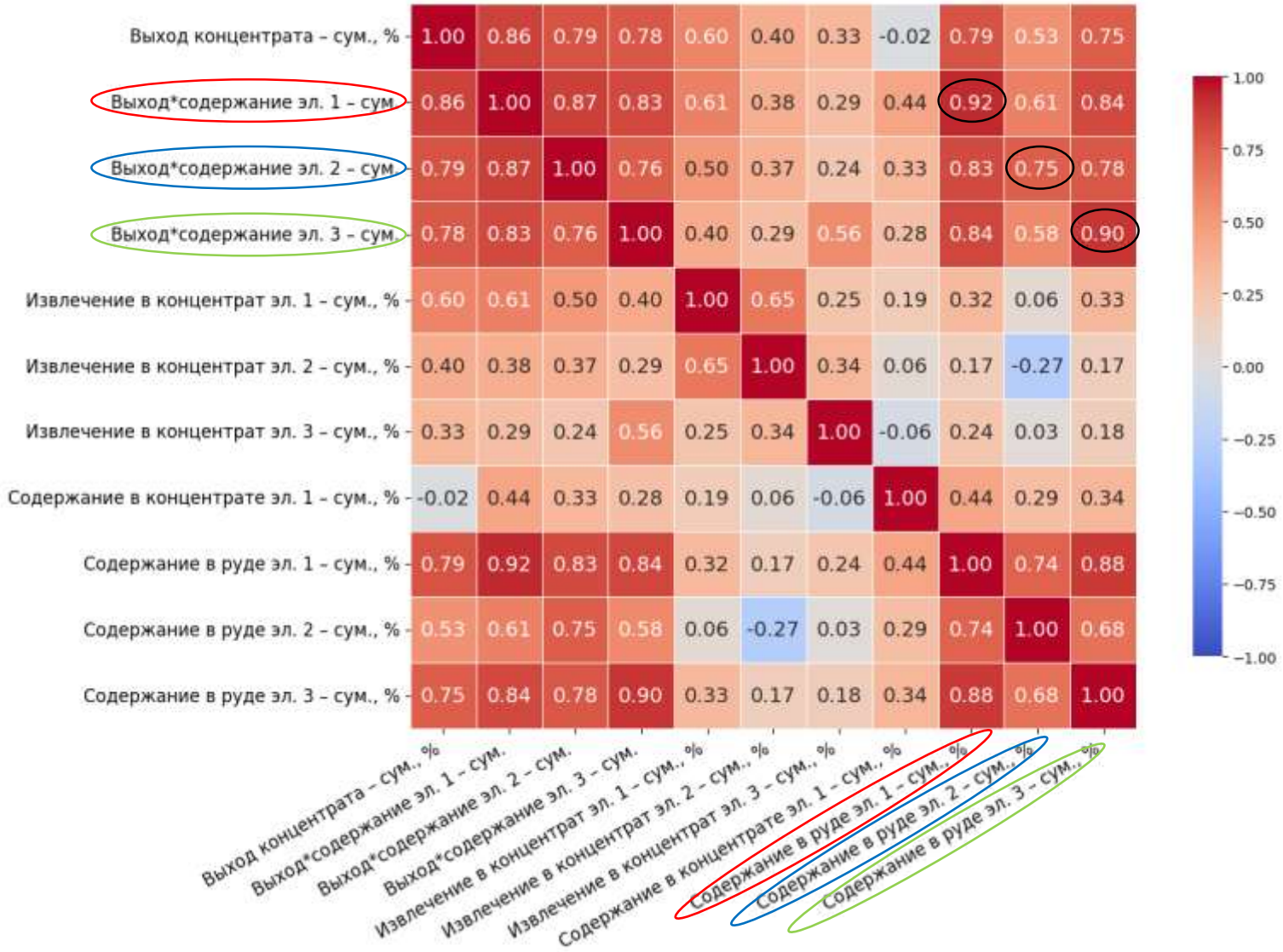


Показатели	Переработка, т/сут	Элемент			
		1	2	3	4
		Содержание в руде, %			
Среднее	2051.00	0.749	0.162	0.416	-
Мин.	13108.13	0.498	0.103	0.256	
25%	5926.99	0.695	0.148	0.370	
50%	12118.98	0.756	0.160	0.413	
75%	13184.64	0.805	0.174	0.460	
max	14091.95	0.974	0.330	0.866	
σ	1595.60	0.081	0.020	0.063	
	Выход концентрата, %	Содержание в концентрате, %			
		1	2	3	4
Среднее	5.28	10.23	1.92	5.97	23.85
Мин.	3.76	7.28	1.25	3.56	15.34
25%	4.83	9.84	1.82	5.44	22.29
50%	5.30	10.25	1.92	5.88	23.97
75%	5.74	10.65	2.02	6.42	25.31
Max	7.24	13.99	2.57	9.72	30.02
Σ	0.60	0.67	0.15	0.73	2.25
		Извлечение в концентрат, %			
Среднее		72.03	62.98	75.92	-
Мин.		54.16	35.88	43.49	
25%		69.96	59.85	71.45	
50%		72.21	63.24	71.82	
75%		74.33	66.34	80.15	
Max		93.78	93.97	98.61	
Σ		3.53	5.40	6.38	

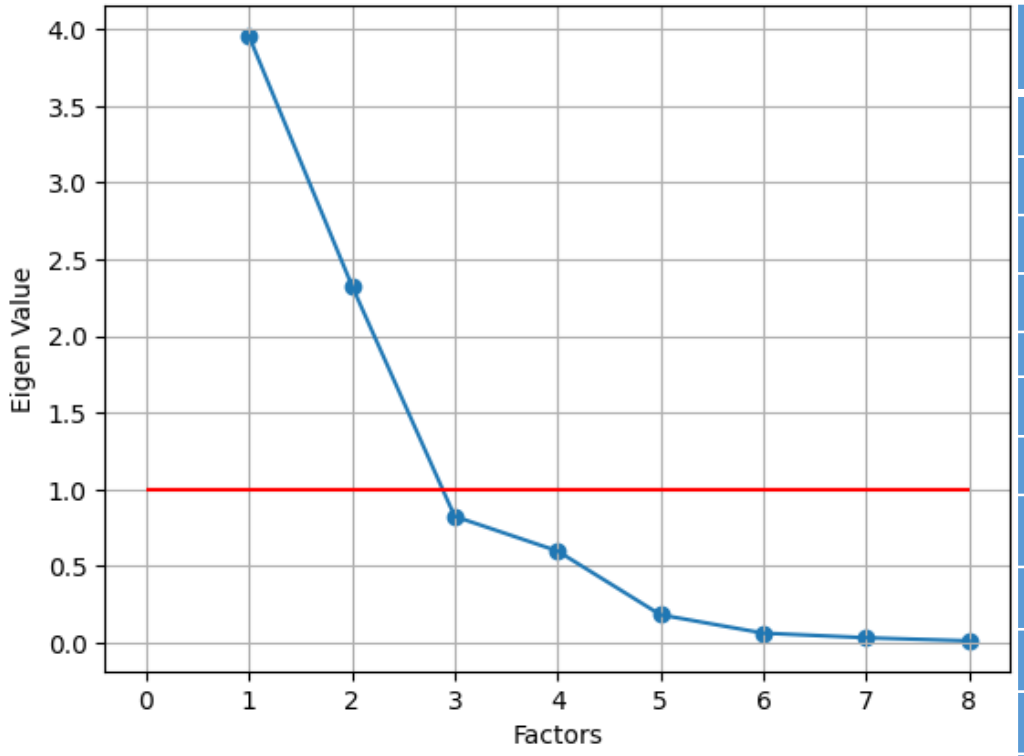
Процесс в основном ориентируется на элемент 1, являющийся наиболее ценным из трёх целевых элементов.

Целевые элементы в порядке значимости и ориентированности на них процесса: 1, 3 и 2.
Элемент 4 не является целевым, но оказывает влияние на процесс переработки концентрата.

Дополнительные параметры и карта корреляций Спирмена



Рассмотрение факторов



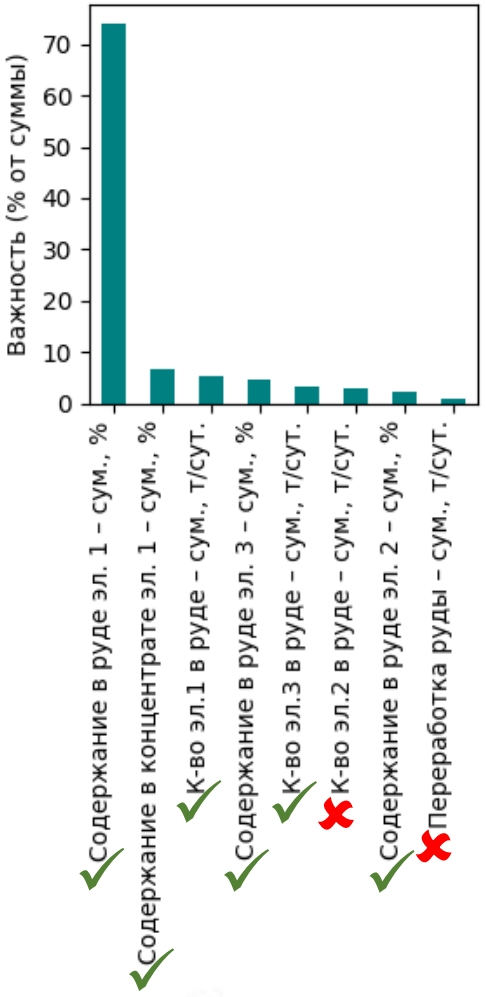
Количество факторов

Признак	Фактор			Значения Communalities
	0	1	2	
Переработка руды – сум., т/сут.	-0.436	0.881	-0.194	1.005
К-во эл.1 в руде – сум., т/сут.	0.376	0.885	0.041	0.927
К-во эл.2 в руде – сум., т/сут.	0.149	0.740	0.654	0.998
К-во эл.3 в руде – сум., т/сут.	0.551	0.776	0.024	0.906
Содержание в руде эл. 1 – сум., %	0.913	0.075	0.268	0.910
Содержание в руде эл. 2 – сум., %	0.563	-0.182	0.805	0.998
Содержание в руде эл. 3 – сум., %	0.907	0.142	0.181	0.876
Содержание в концентрате эл. 1 – сум., %	0.418	0.084	0.108	0.194
Ключевые показатели факторного анализа				
Дисперсия	2.806	2.776	1.230	
Доля дисперсии	0.351	0.347	0.154	
Нарастающая сумма	0.351	0.698	0.852	

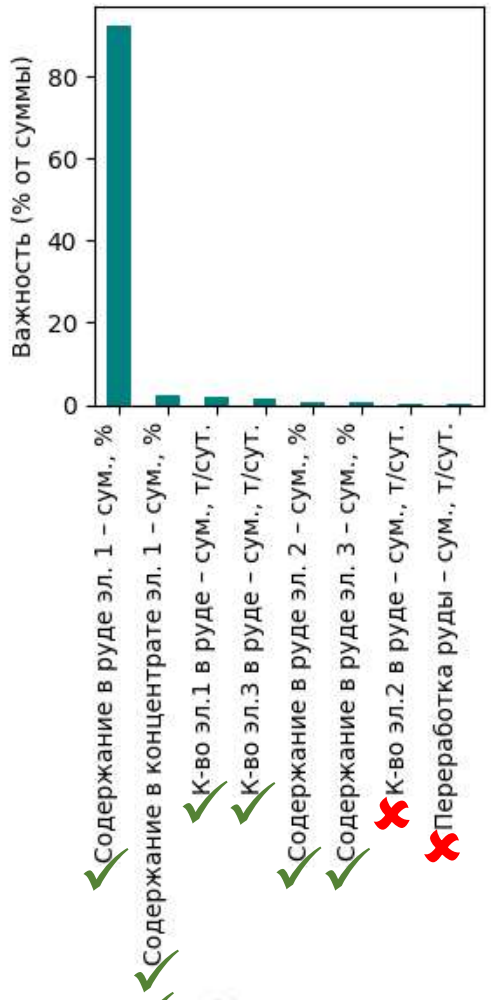
№ фактора	Наименование
0	Качество руды по элементам 1 и 3 и качество концентрата по элементу 1
1	Переработка
2	Качество руды по элементу 2

Важность признаков

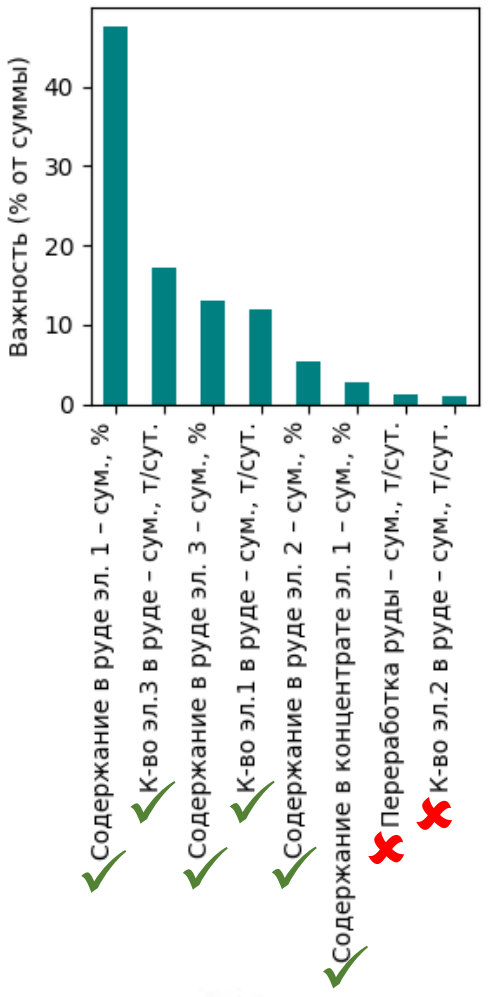
CatBoostRegressor



GradientBoostingRegressor



LinearRegression

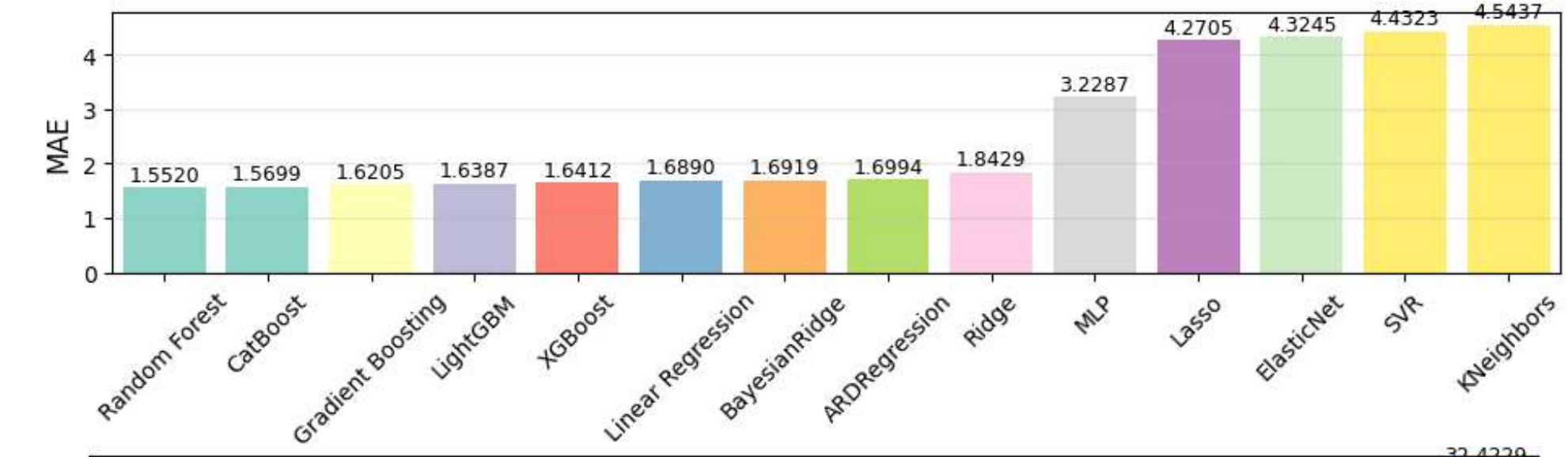


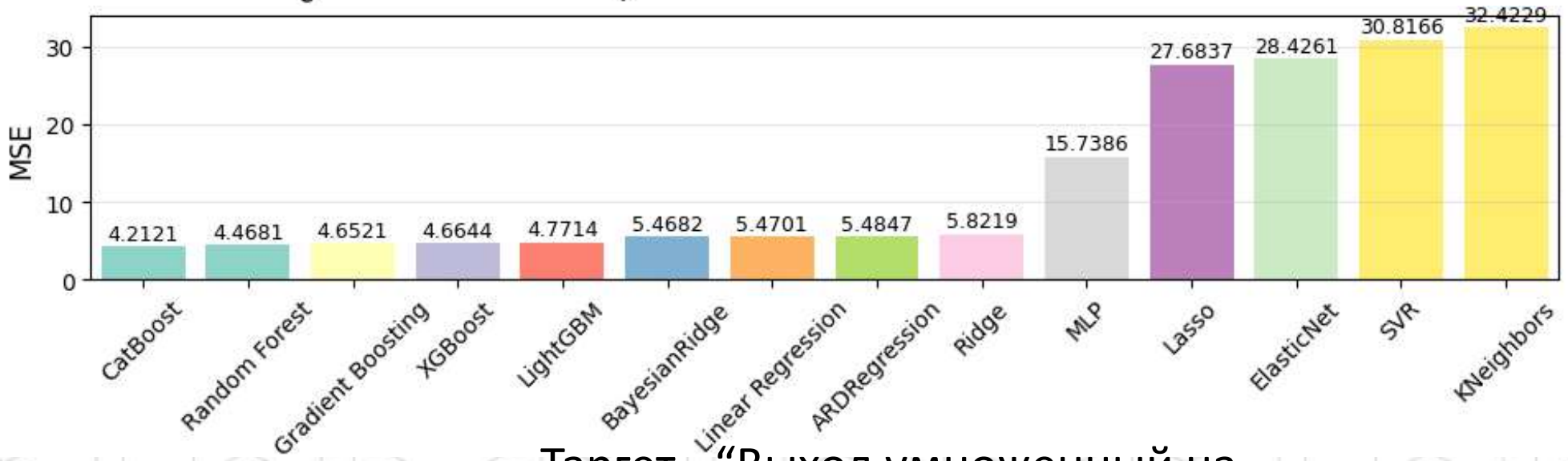
Признаки для дальнейшего обучения моделей: ✓ - принятые;

✘ - исключенные.

Таргет - “Выход умноженный на содержание элемента 1 в концентрате”

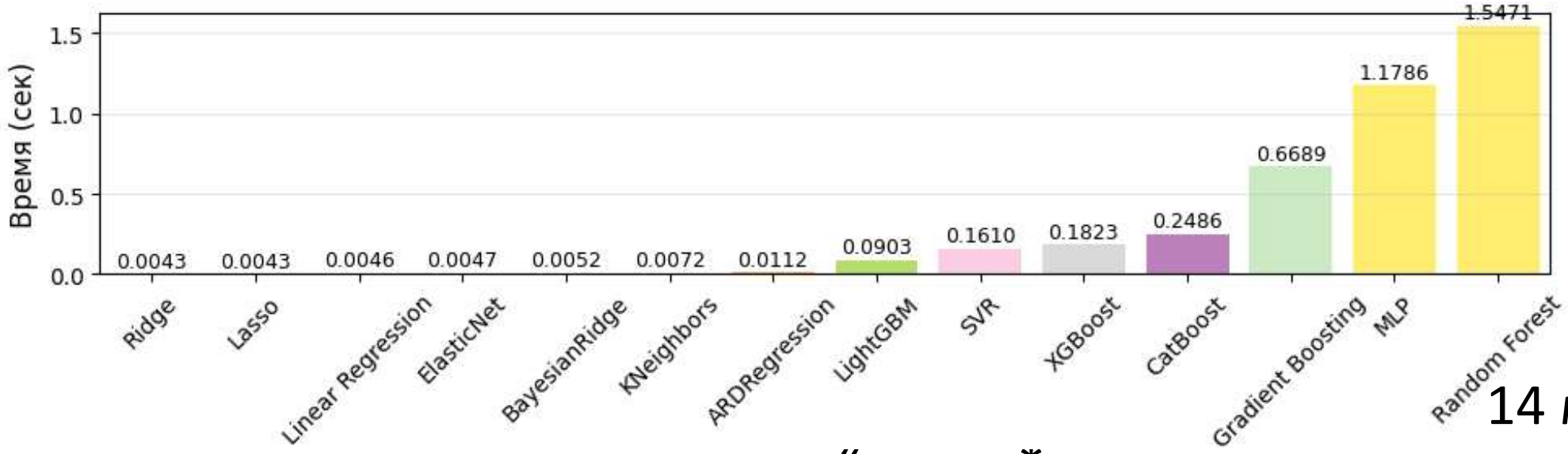
Сравнение 14 моделей (элемент 1)





Таргет - “Выход умноженный на содержание элемента 1 в концентрате”

Сравнение моделей (элемент 1)



14 моделей.

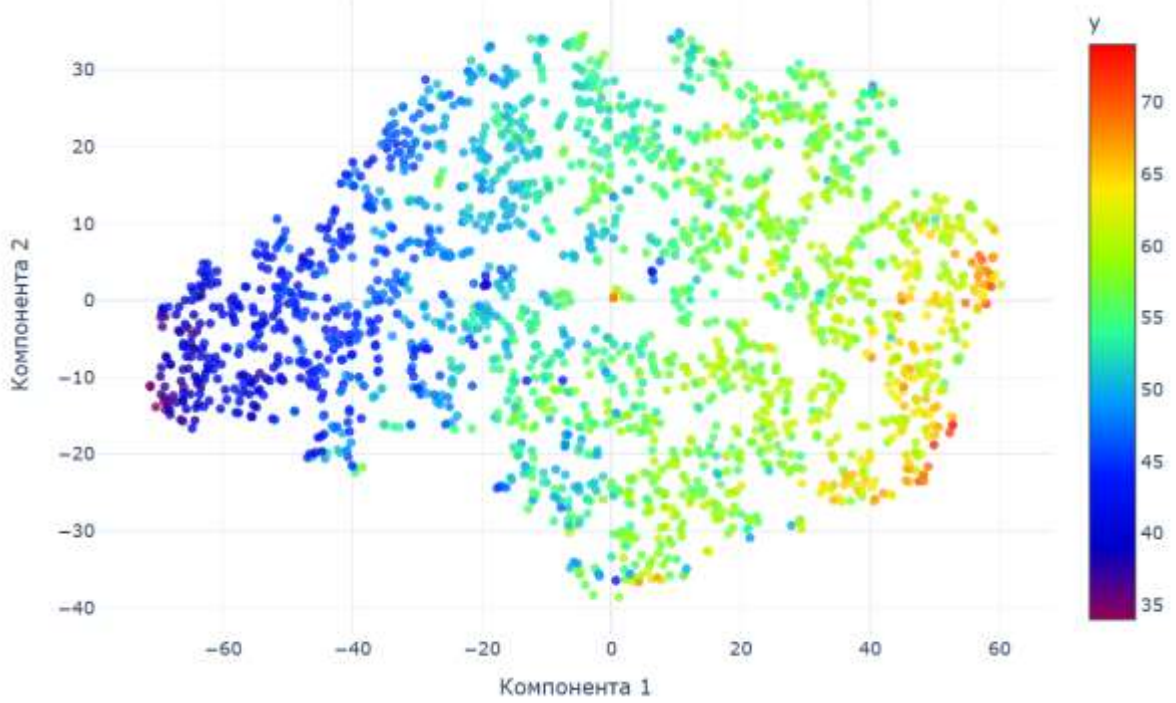
Изменение метрик по параметру “выход*содержание элемента 1” в концентрате в результате оптимизации параметров CatBoostRegressor

Метрика	Базовые	Оптимизир.
MAE	1.552	1.548
MSE	4.212	4.098

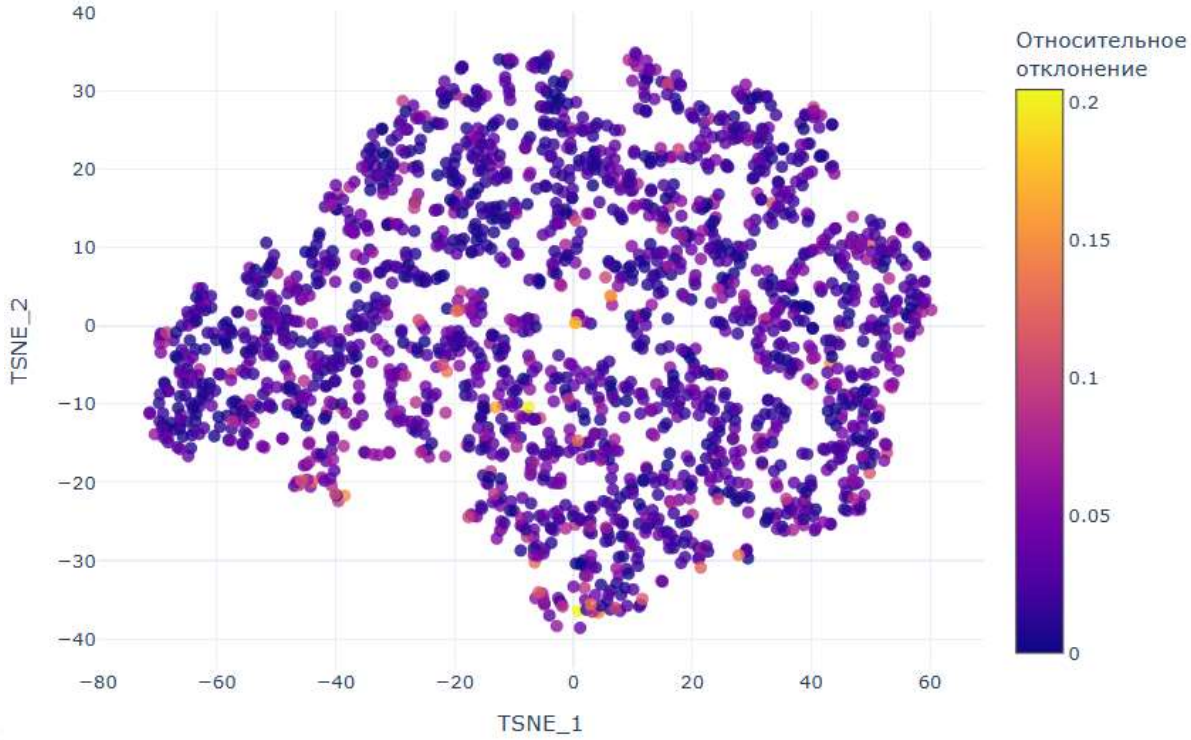
Параметр	Базовые	Оптимизир.	Изменение
iterations / n_estimator	100	494	Увеличение в 4,94 раза
learning_rate	0,1	0,03437	Снижение на 65,6%
depth	6	5	Уменьшение на 1 уровень
l2_leaf_reg	3,0	8,909	Увеличение в 2,97 раза
loss_function	RMSE	RMSE	без изменений
verbose	0	0	без изменений
subsample	1,0	0,7428	Снижение на 25,7%

Улучшению метрик (элемент 1)

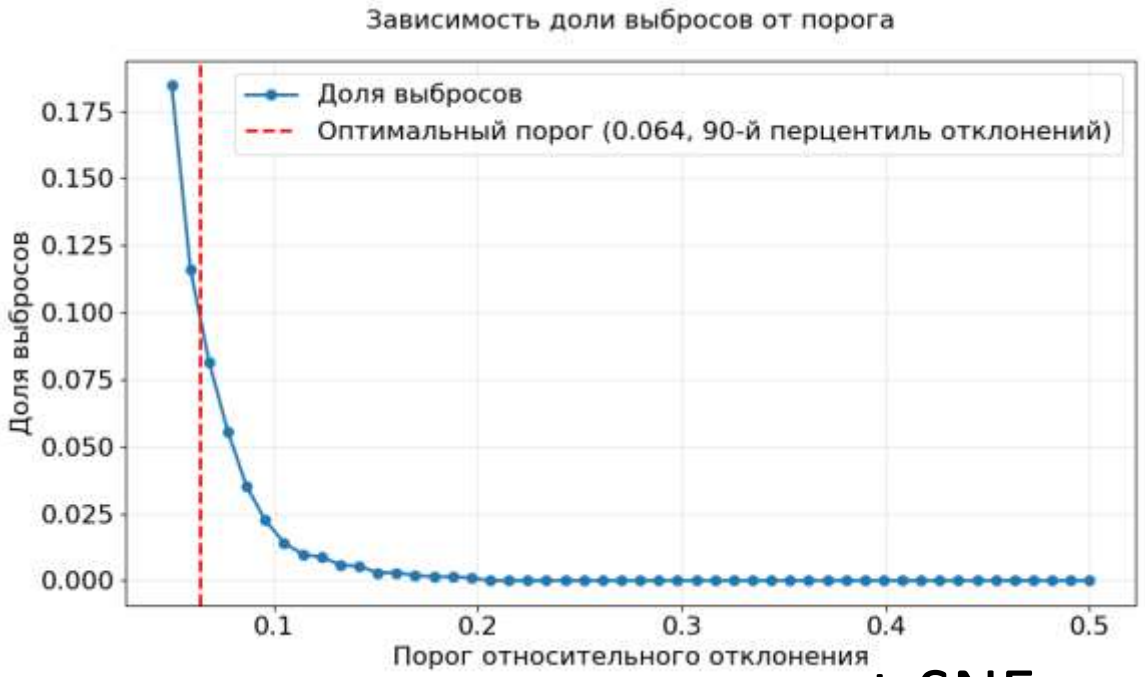
t-SNE
(параметр выход*содержание эл. 1)

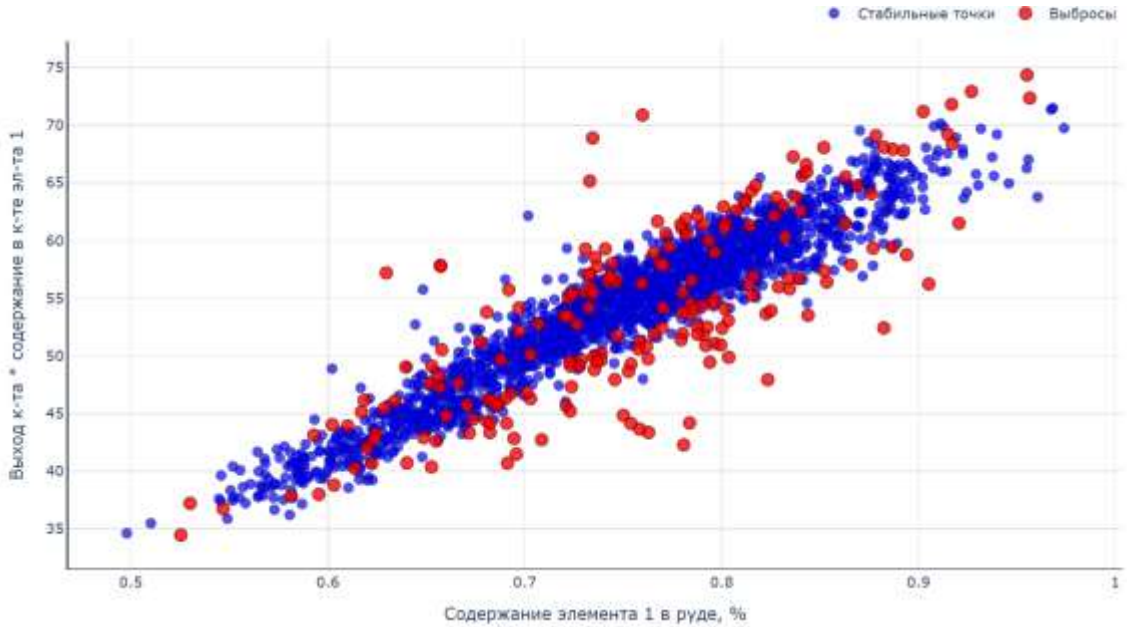


Отклонение параметра по 10 ближайшим соседям



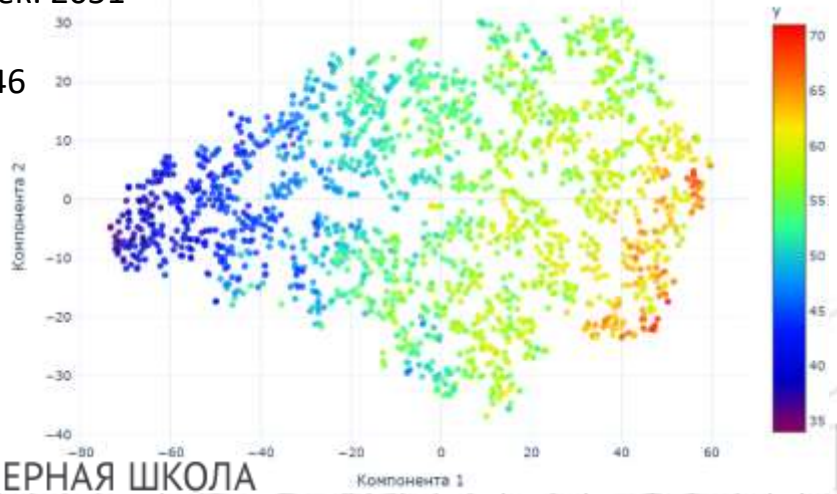
Улучшению метрик (элемент 1)





Исходное количество точек: 2051
Выбросов: 205
Оставшихся значений 1846

t-SNE после



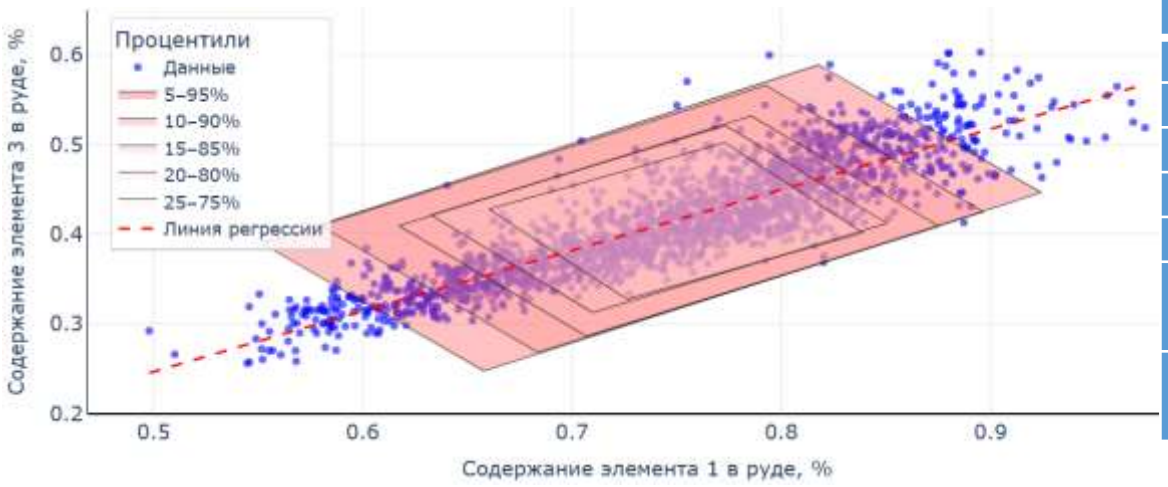
Таргет

Метрика	Было	Стало
MAE	1.548	1.311
MSE	4.098	2.716

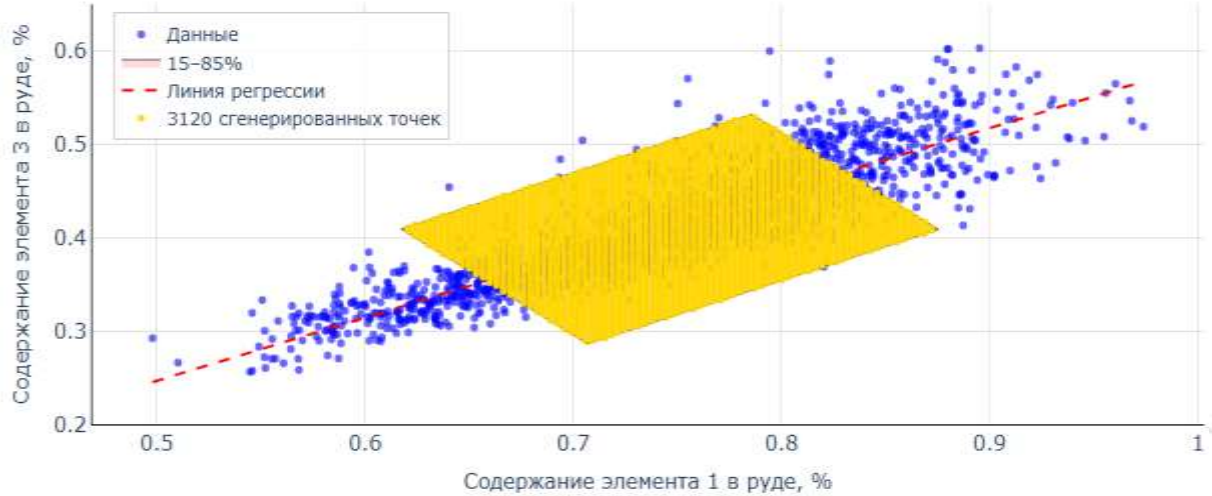
Рассчитываемые показатели

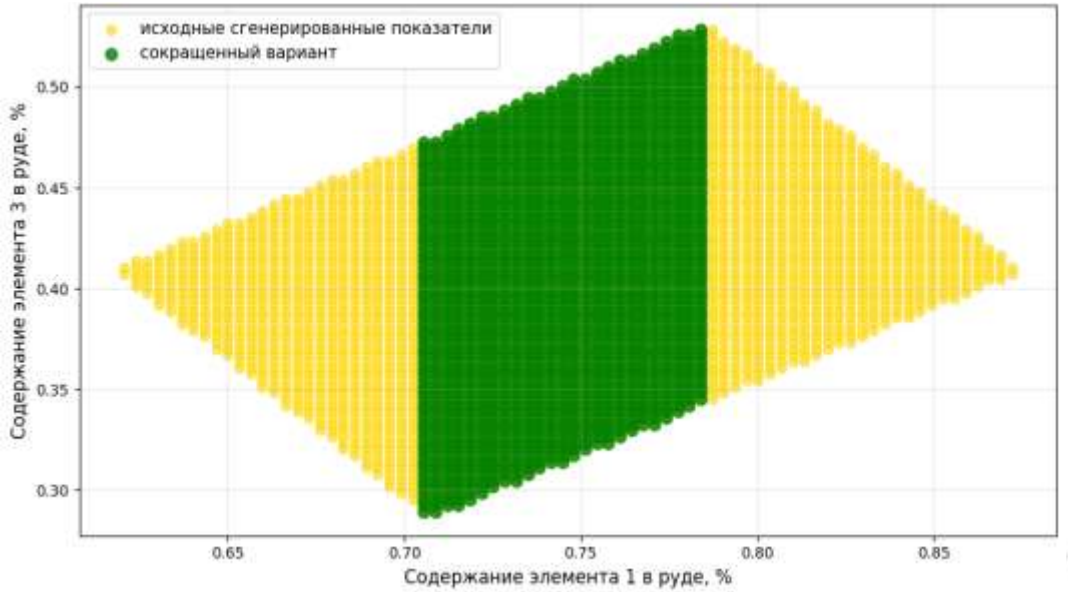
Показатель	MAE	MSE
Выход концентрата, %	0.129	0.026
Извлечение элемента 1, %	1.77	4.80

Создание синтетического набора данных на примере содержаний элементов 1 и 2 в руде



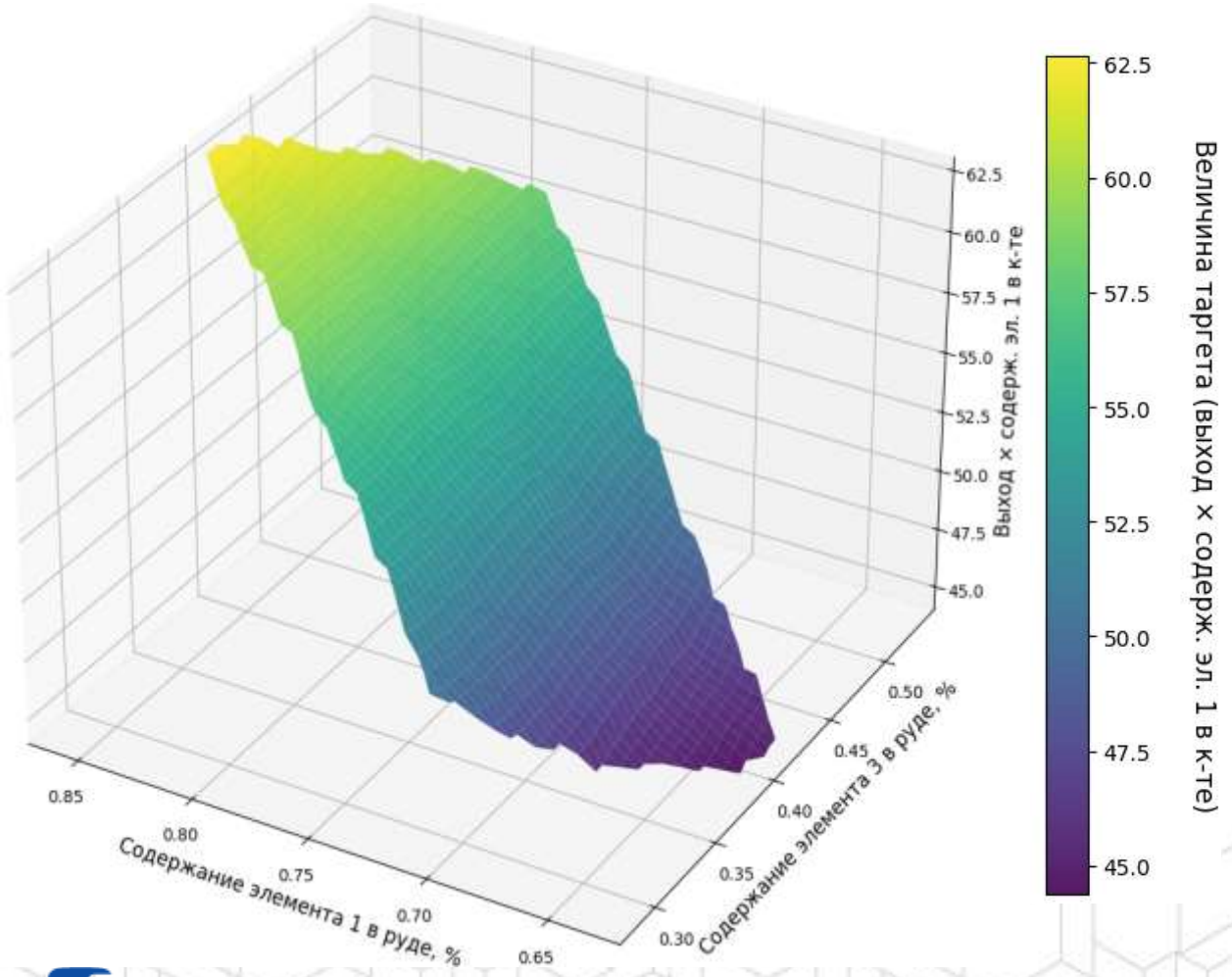
Признак	Значение		
	Среднее	Миним.	Макс.
К-во эл.3 в руде – сум., т/сут.	54.599	40.932	68.266
Содержание в руде эл. 1 – сум., %	0.742	0.633	0.851
К-во эл.1 в руде – сум., т/сут.	97.134	82.861	111.41
Содержание в руде эл. 3 – сум., %	0.417	0.312	0.521
Содержание в руде эл. 2 – сум., %	0.161		
Содержание в концентрате элемента 1 %	10.24		
Переработка руды, т/сут. (используется для расчета признаков)	13098		



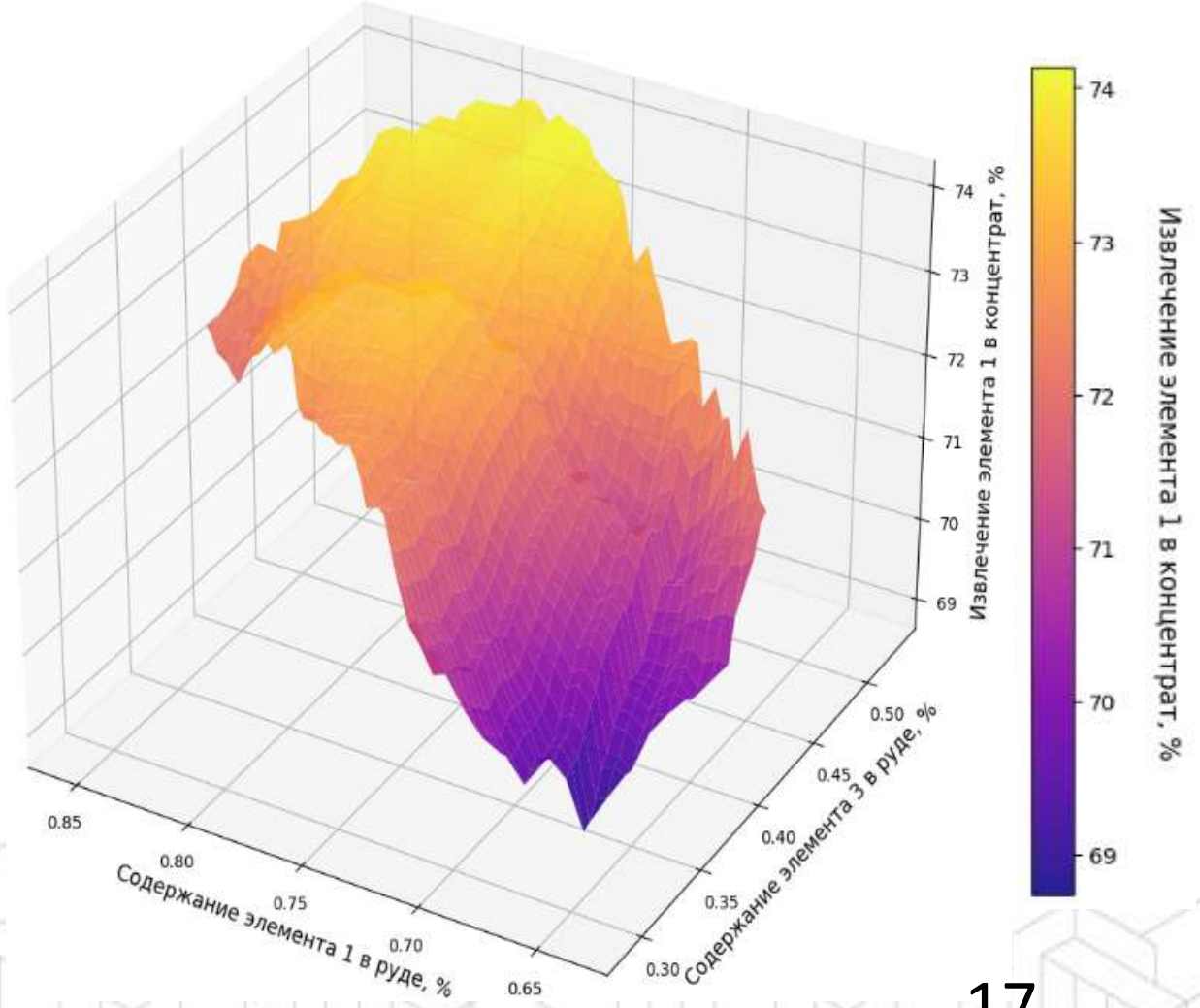


Элемент 1 – фиксированное качество концентрата и переработка

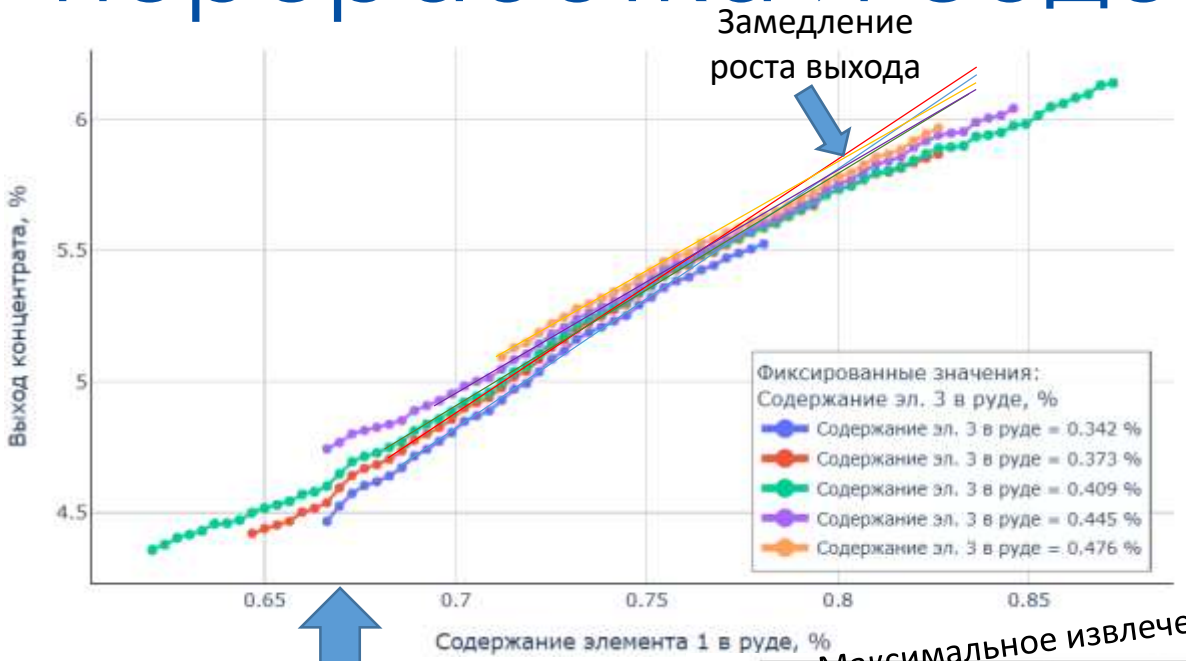
Таргет



Извлечение элемента 1 в концентрат, %

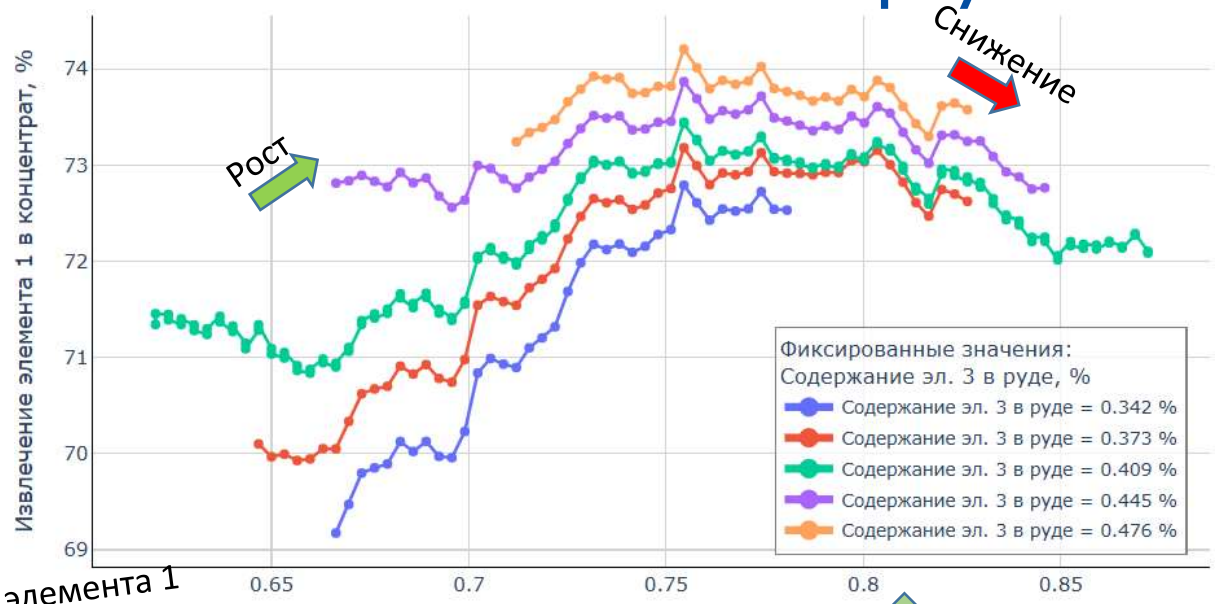


Элемент 1 – фиксир. качество концентрата, переработка и содерж. элемента 2 в руде

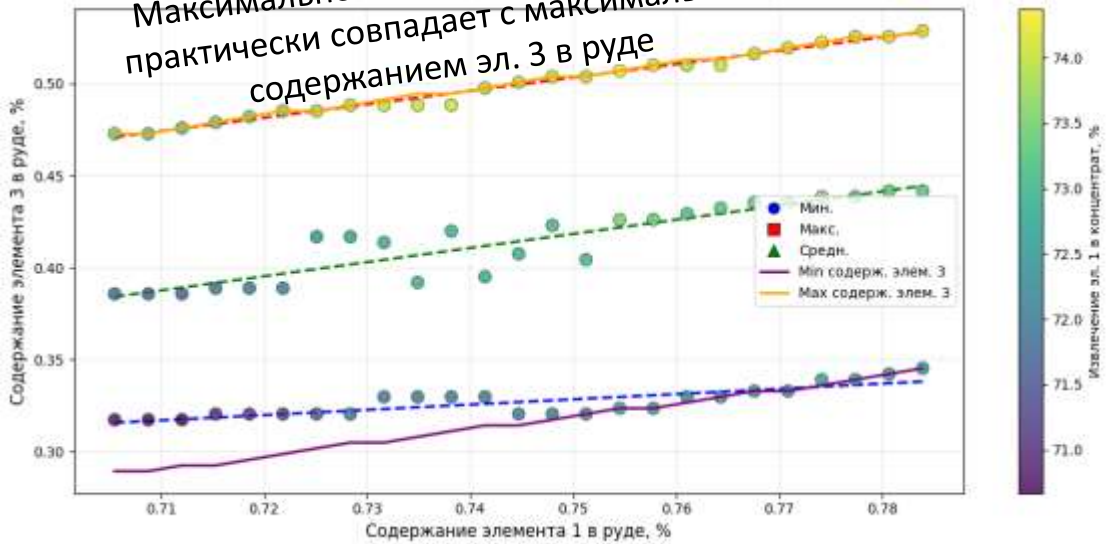


Выход концентрата, %

Оцениваем тенденции по качеству руды, %



Максимальное извлечение элемента 1 практически совпадает с максимальным содержанием эл. 3 в руде

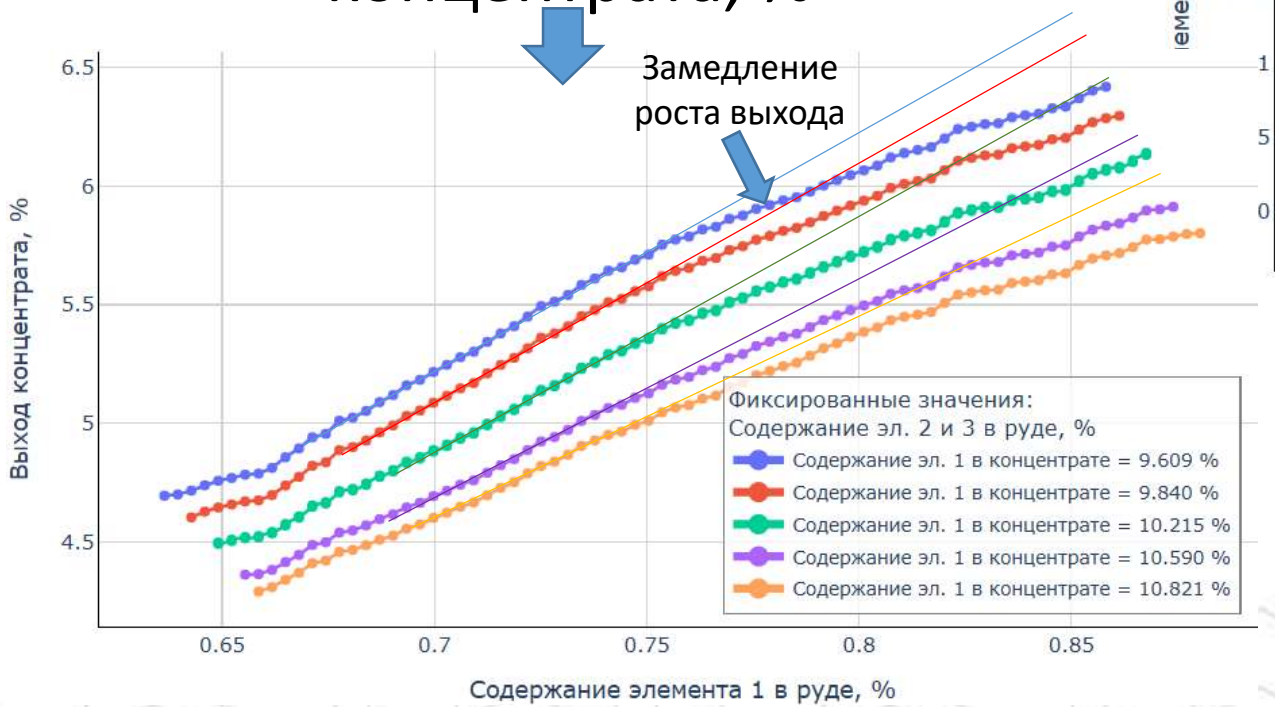


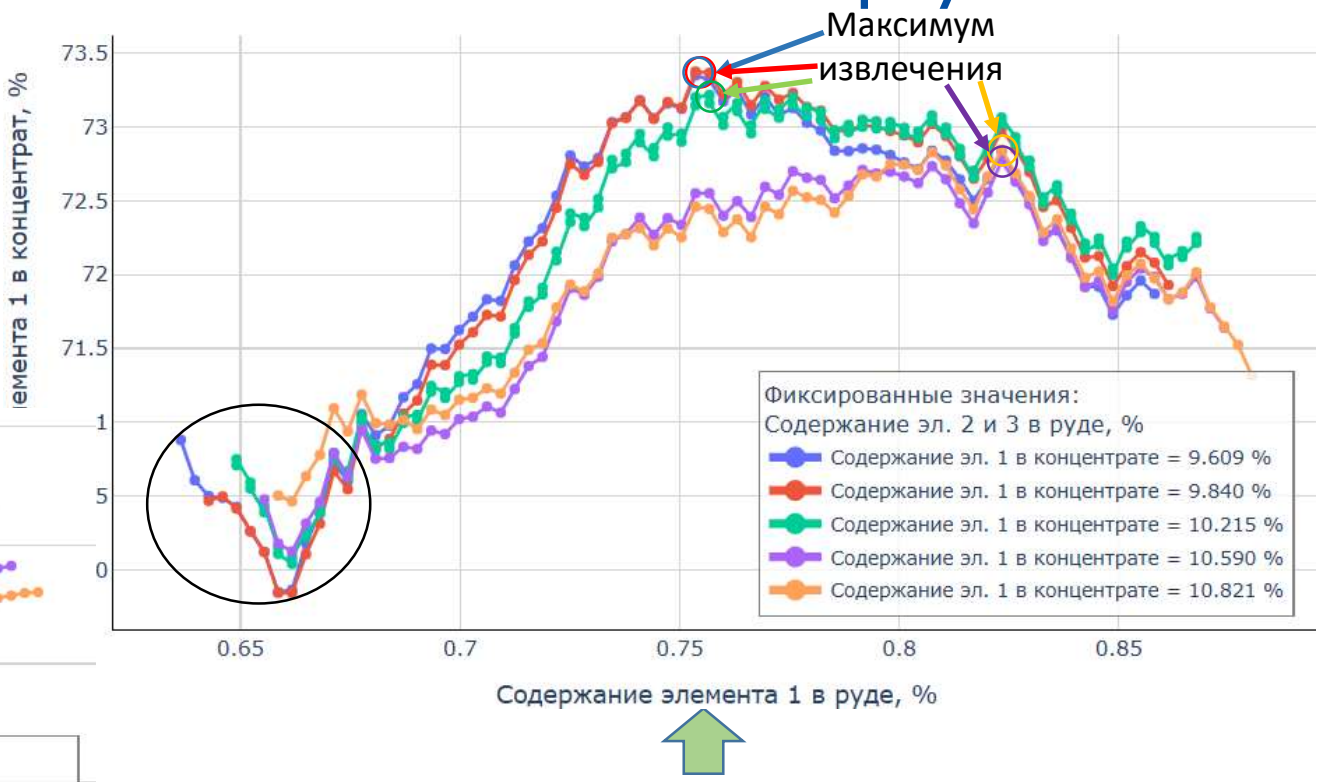
Извлечение элемента 1 в концентрат, %

Элемент 1 – фиксированные: переработка и содержание элементов 2 и 3 в руде

Оцениваем тенденции по качеству концентрата, %

Выход концентрата, %

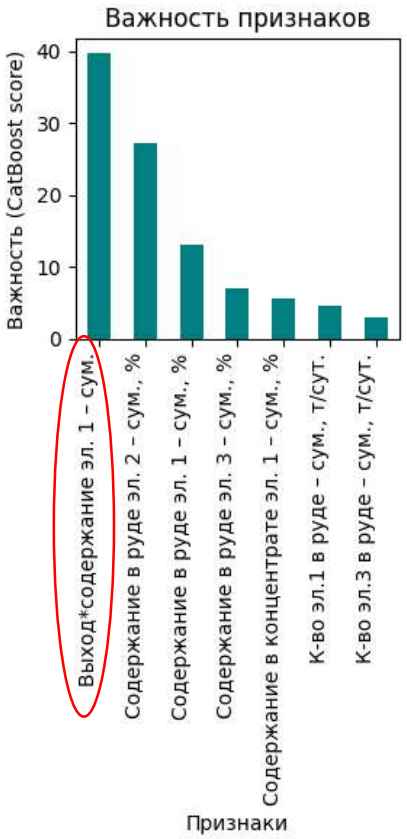




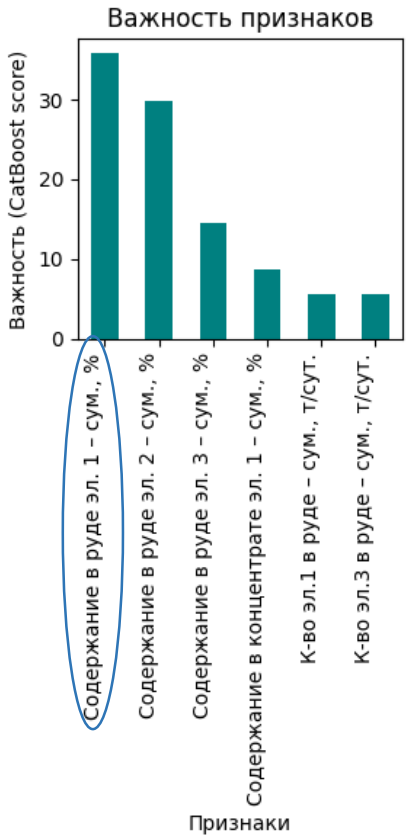
Извлечение элемента 1 в концентрат, %

Элемент 2

Таргет - “Выход*содержание элемента 2 в концентрате”



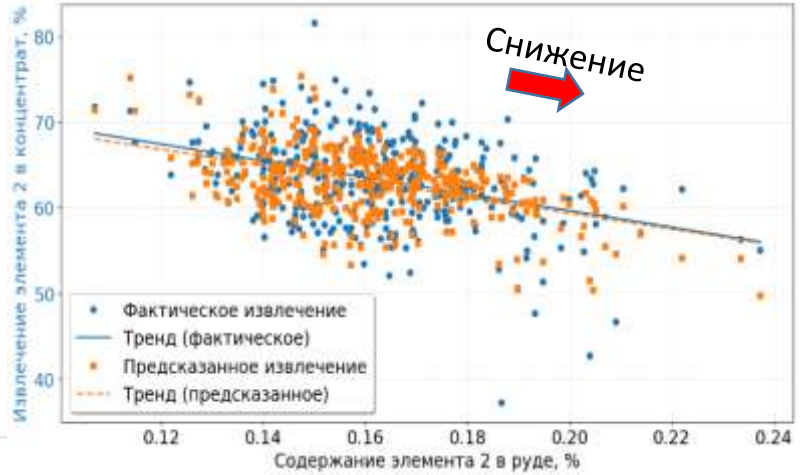
Вариант 1



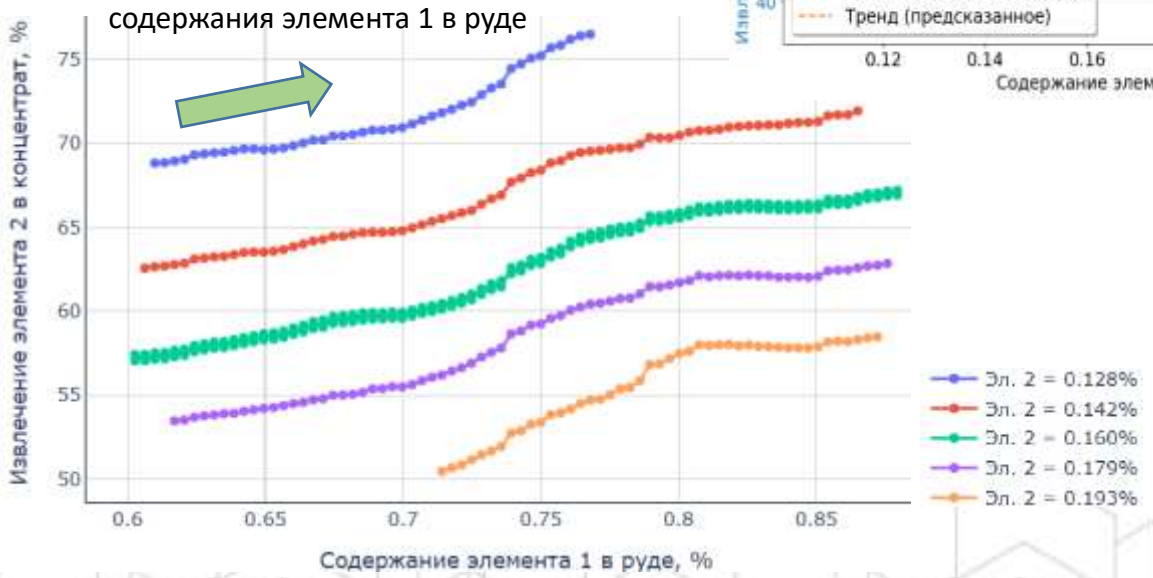
Вариант 2

Для варианта 2 - лучшие метрики получены для модели CatBoost из 14 протестированных.

Метрика	Вариант 1	Вариант 2
MAE	0.438	0.430
MSE	0.364	0.355



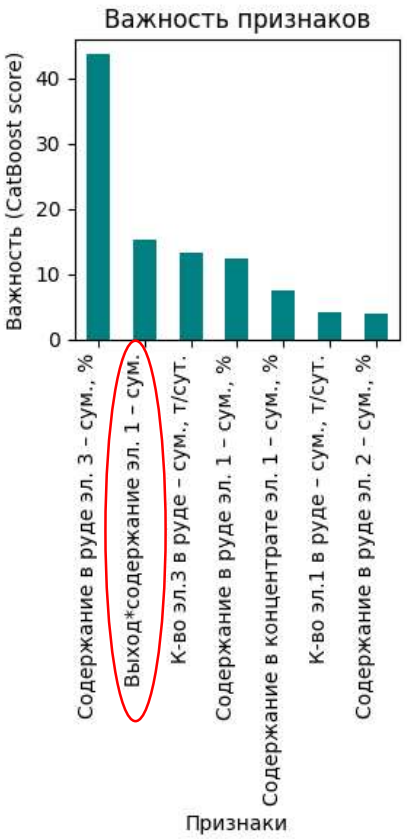
Рост извлечения элемента 2 в концентрат с увеличением содержания элемента 1 в руде



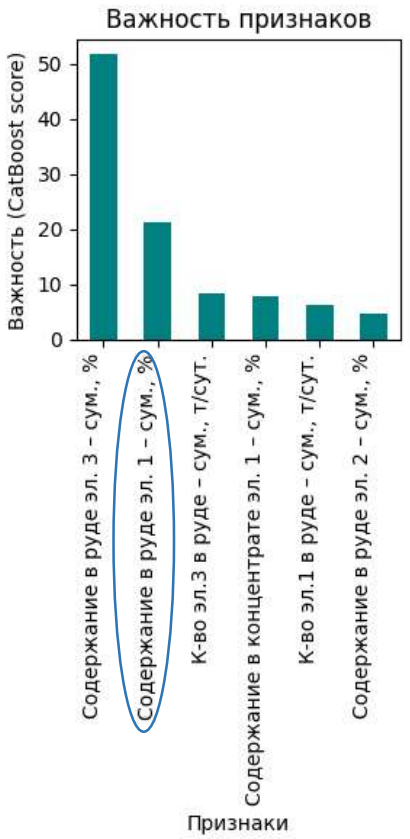
Для извлечения эл. 2 (варианта 2) - MAE 2.61, MSE 12.3

Элемент 3

Таргет - “Выход*содержание элемента 3 в концентрате”



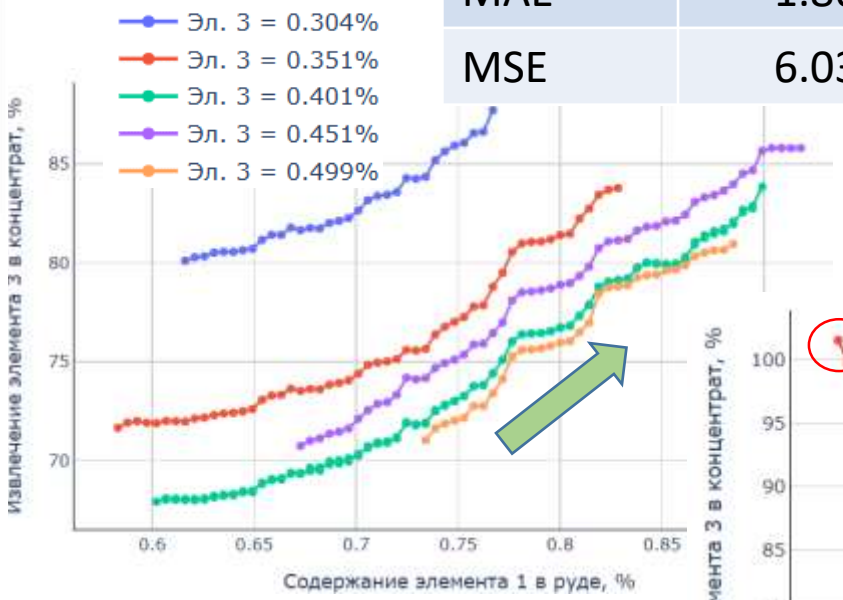
Вариант 1



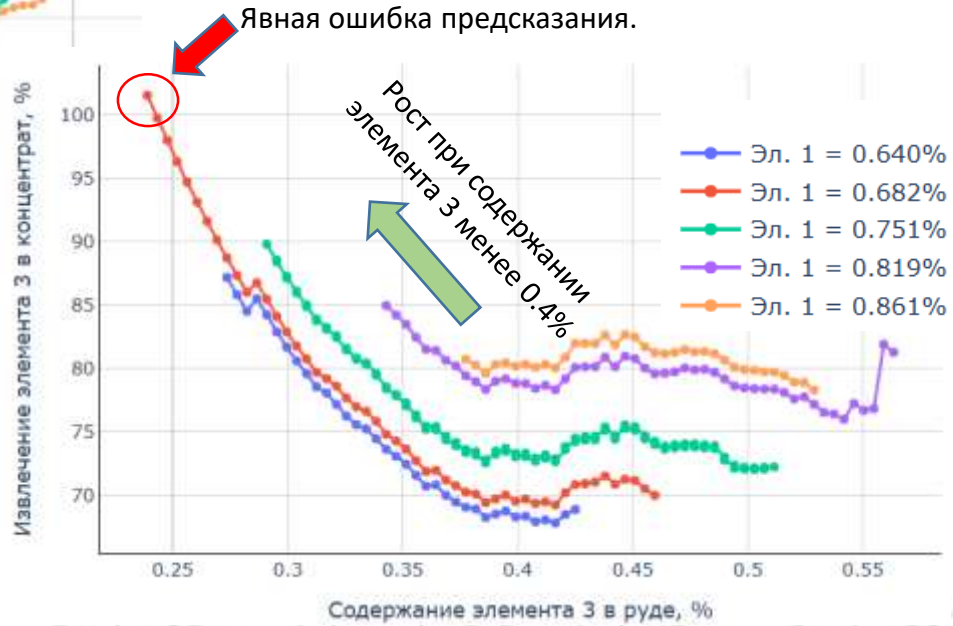
Вариант 2

Для вариантов 1 и 2 - лучшие метрики получены для модели CatBoost из 14 протестированных.

Метрика	Вариант 1	Вариант 2
MAE	1.86	1.84
MSE	6.03	5.89

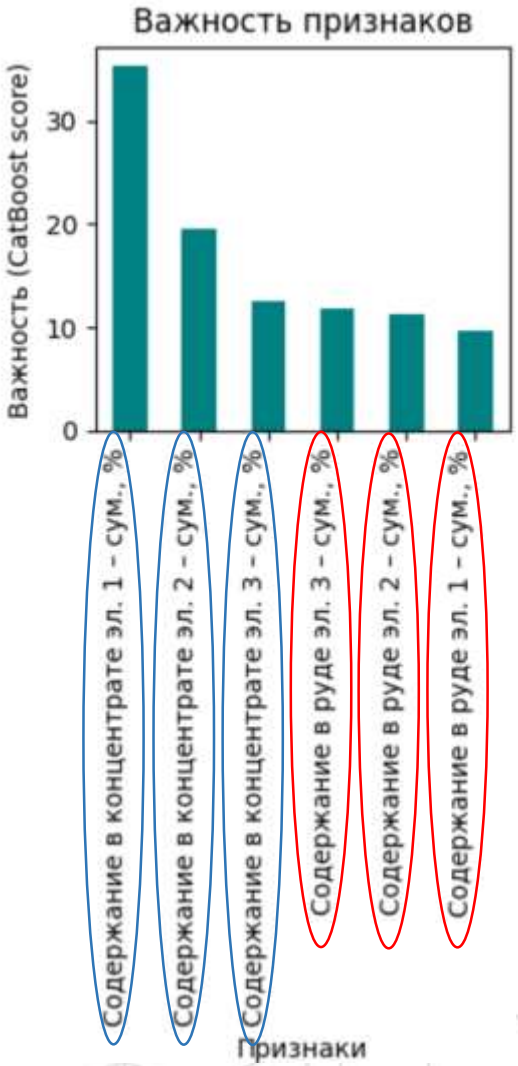


Рост извлечения элемента 3 в концентрат с увеличением содержания элемента 1 в руде



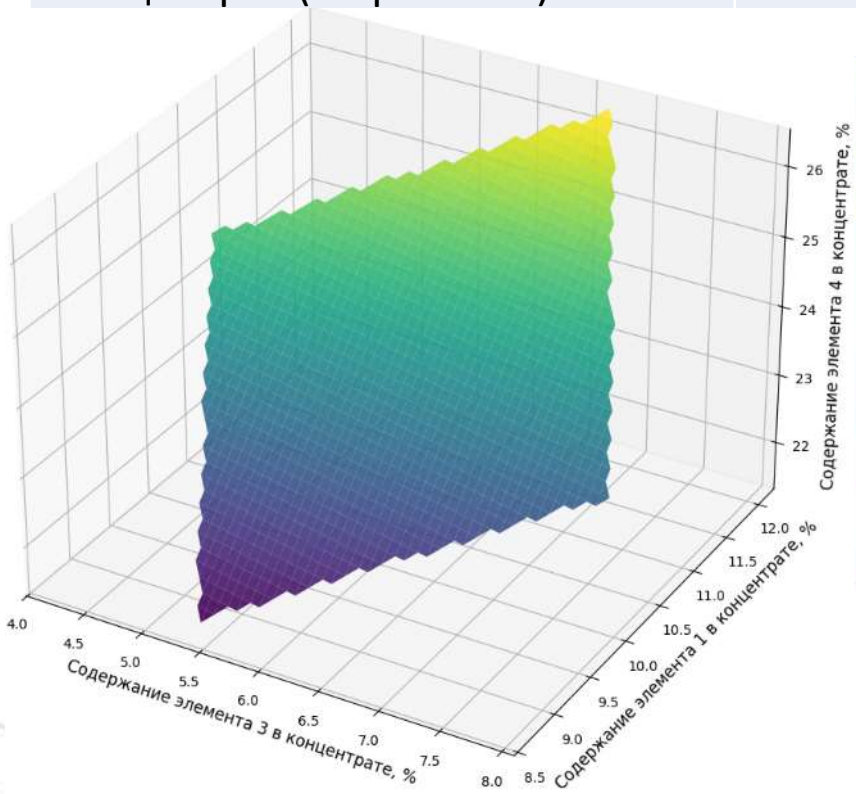
Для извлечения эл. 3 (варианта 2) - MAE 4.01, MSE 33.2

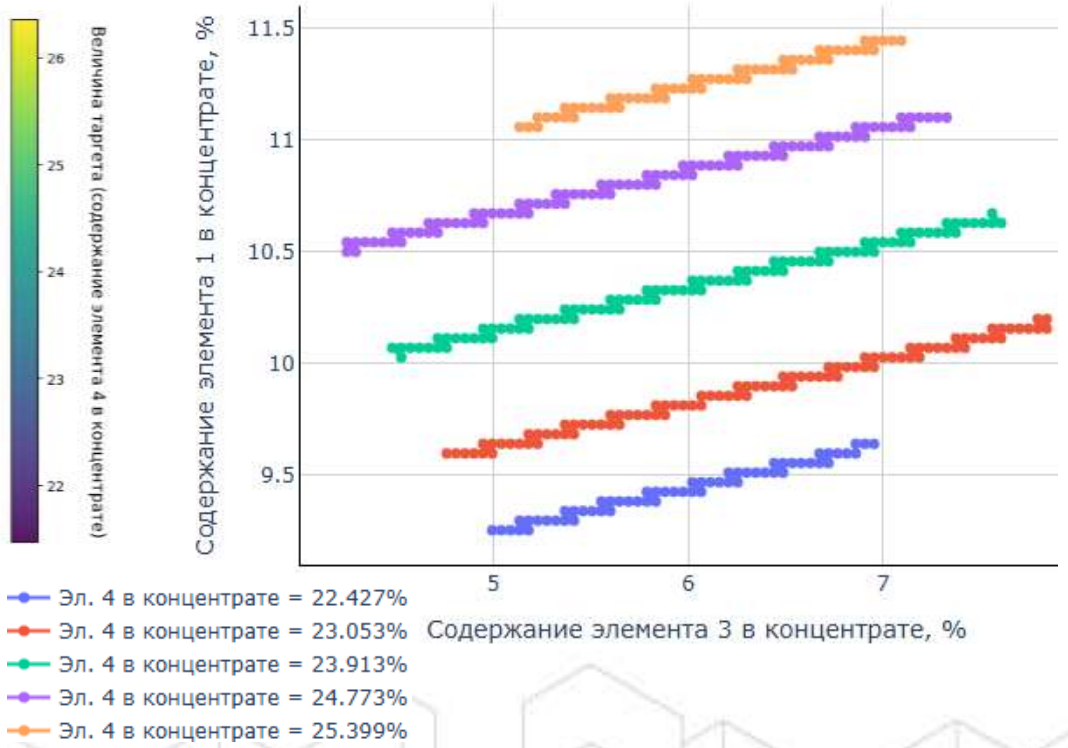
Элемент 4 (данные есть только по концентрату)



Протестированы 14 моделей:

Признаки	Лучшая модель	MAE	MSE
Руда и концентрат (6 признаков)	байесовская регрессия	1.27	2.56
Концентрат (3 признака)	линейная регрессия	1.29	2.64





Таргет - “Содержание элемента 4 в концентрате”

Содержание элемента 2 фиксировано на уровне 1,95%

Выполнение целей и задач работы

Задачи:	**Выполнение**
1. подготовка данных;	V
2. отбор признаков и выбор таргетов;	V
3. подбор наилучших моделей и последующая их оптимизация;	V
4. создание синтетических наборов данных, предсказание таргетов, расчёт дополнительных показателей;	V
5. визуализация результатов и их рассмотрение.	V
Цели:	
Определение влияния качества:	
1. концентрата по элементу 1 и содержаний элементов 1 и 3 в руде на выход концентрата и извлечение в него элемента 1;	V
2. руды по элементам 2 и 3 на их извлечение в концентрат;	V
3. концентрата по элементам 1 и 3 на содержание элемента 4.	V

ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт дополнительного образования

ВЫСШАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНЦЕНТРАТ В ПРОЦЕССЕ ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ

по программе профессиональной переподготовки:
«Анализ данных на Python»

Выполнил: Клемятов Александр Анатольевич
Руководитель: к.т.н. Семендяев Родион Юрьевич

Спасибо за внимание!

Санкт-Петербург, 2026