



**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ
И ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Нурканов Евгений Юрьевич

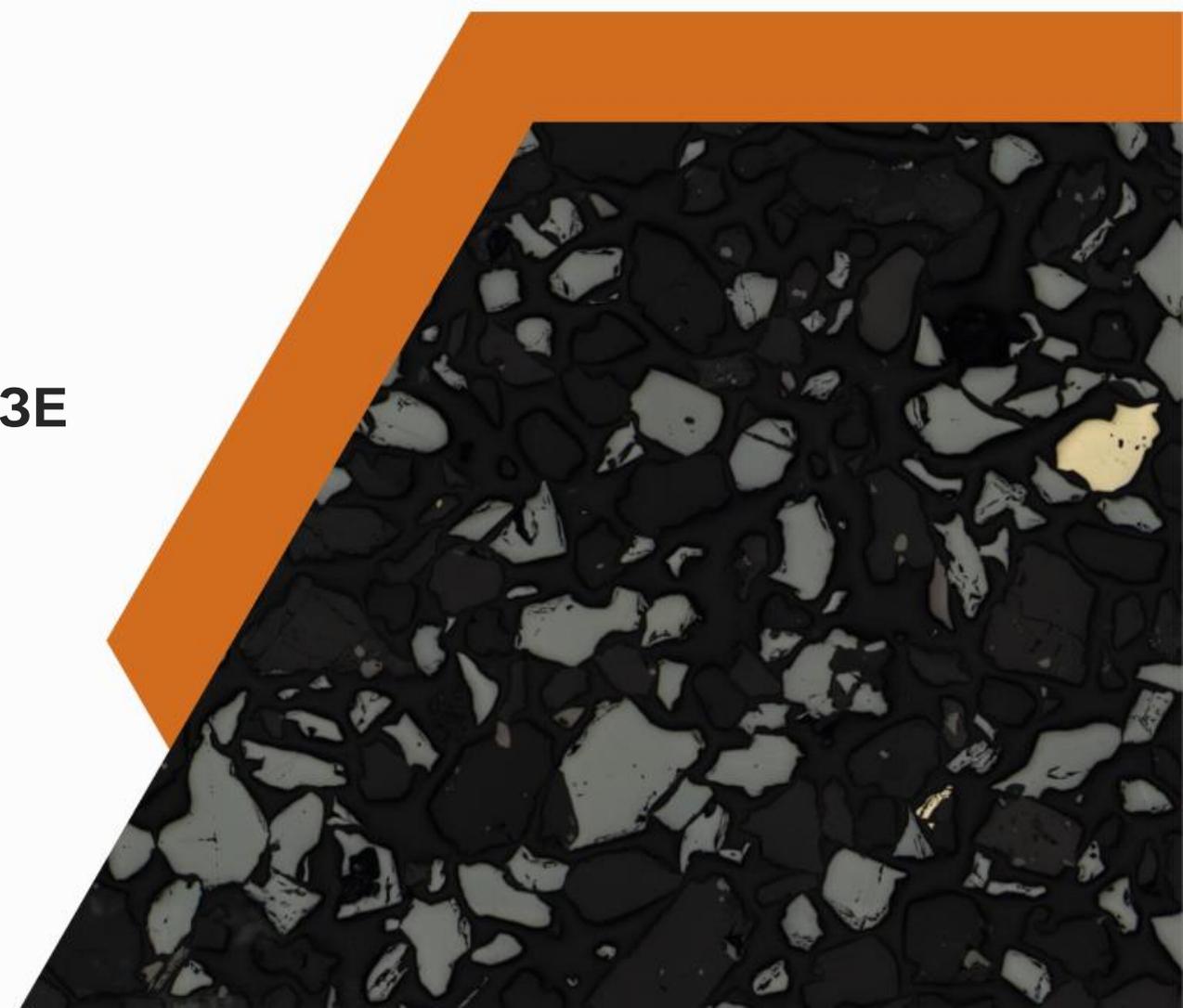
к.т.н., заместитель директора ООО «СИАМС»

Измайлов Дмитрий Яковлевич

ведущий специалист ФГБУ «ВИМС»

Селюминова Юлия Руслановна

ведущий специалист ФГБУ «ВИМС»

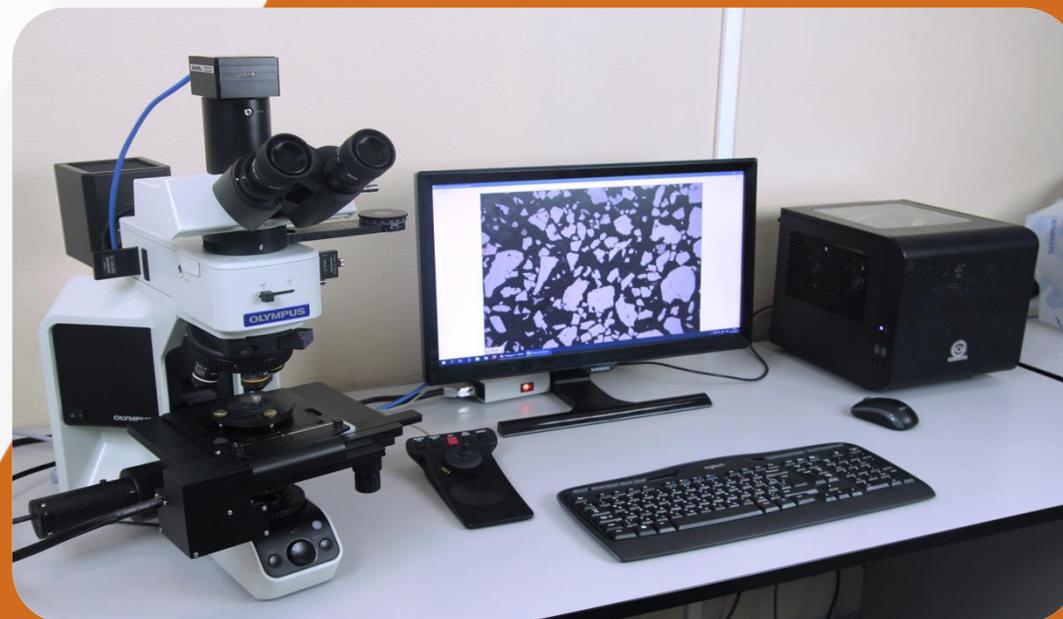


АНАЛИЗАТОР МИНЕРАЛ С7

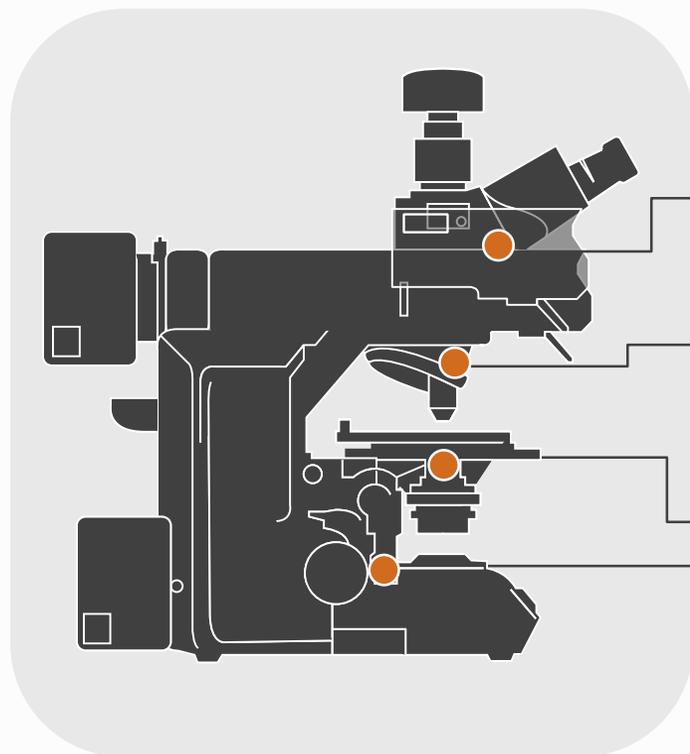
НАЗНАЧЕНИЕ

Автоматизированная лабораторная установка на базе оптического микроскопа для количественного оптико-геометрического анализа минерального сырья и продуктов обогащения с целью технологического аудита показателей обогатимости минерального сырья на основных стадиях его передела: геологоразведка, подготовка сырья, обогащение.

- ✓ Методическая верификация Анализатора «МИНЕРАЛ С7» произведена ВИМС имени Н.М. Федоровского. Регламент определения содержания минералов в полиметаллических сульфидных рудах с использованием АФМТТ содержится в рекомендациях ВИМС имени Н.М. Федоровского № 180 от 2014г.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОТОРИЗОВАННЫХ МИКРОСКОПОВ



Поляризационные фильтры

- Моторизованные

Револьвер объективов

- Моторизованный
- Кодированный

Перемещение столика:

- Моторизованное с энкодерами для перемещения по X-Y

Привод фокуса:

- Моторизованный



Моторизованный стол с энкодерами.
Интерполяция с точностью 10 нм на скорости 0,3 м/сек.
Ход стола 75x75 мм



Моторизованный привод поворотного анализатора и поворотного поляризатора проходящего света



Моторизованный привод револьвера объективов

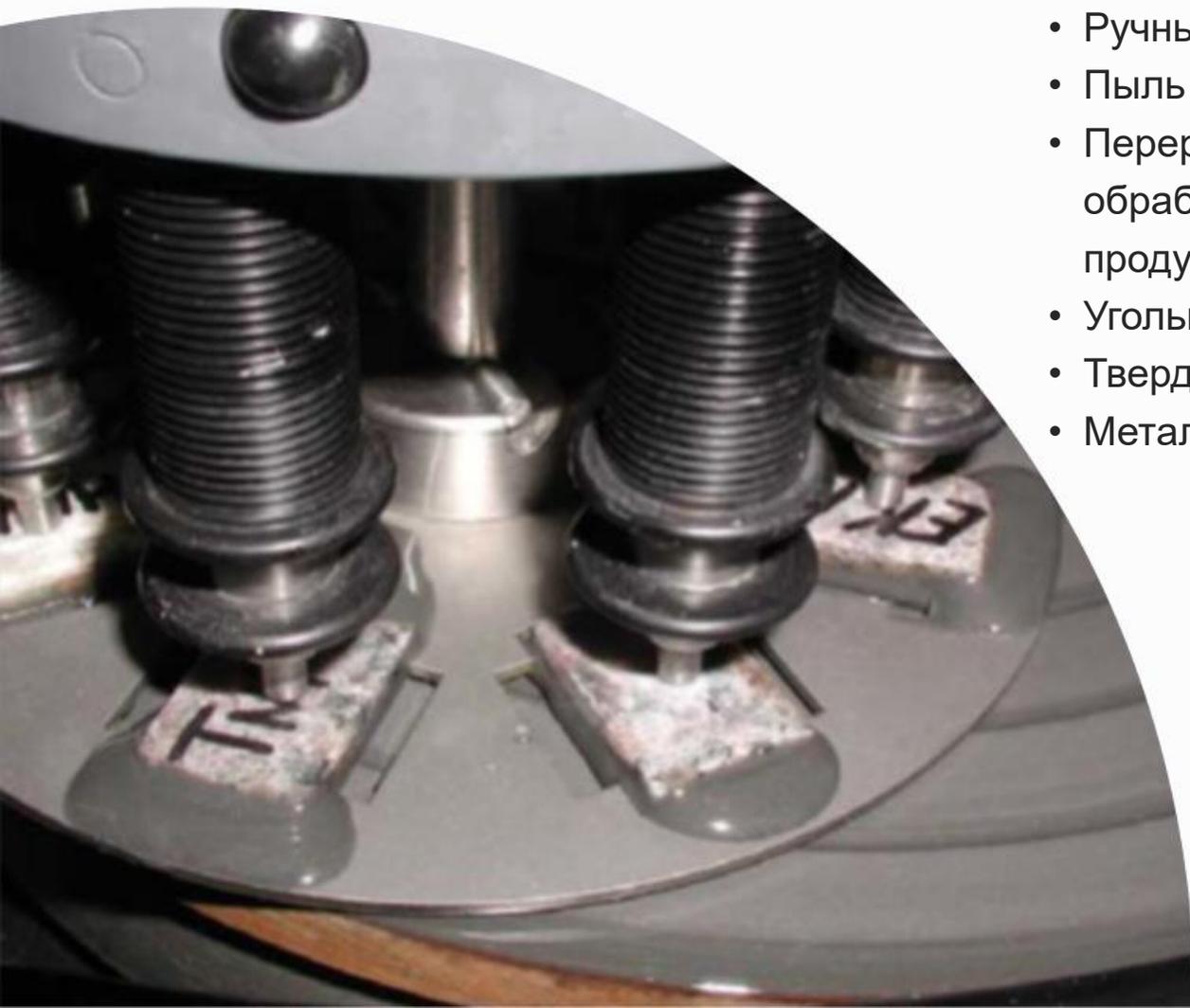


Моторизованный привод Z-фокусировки

РАЗНОВИДНОСТИ ОБРАЗЦОВ

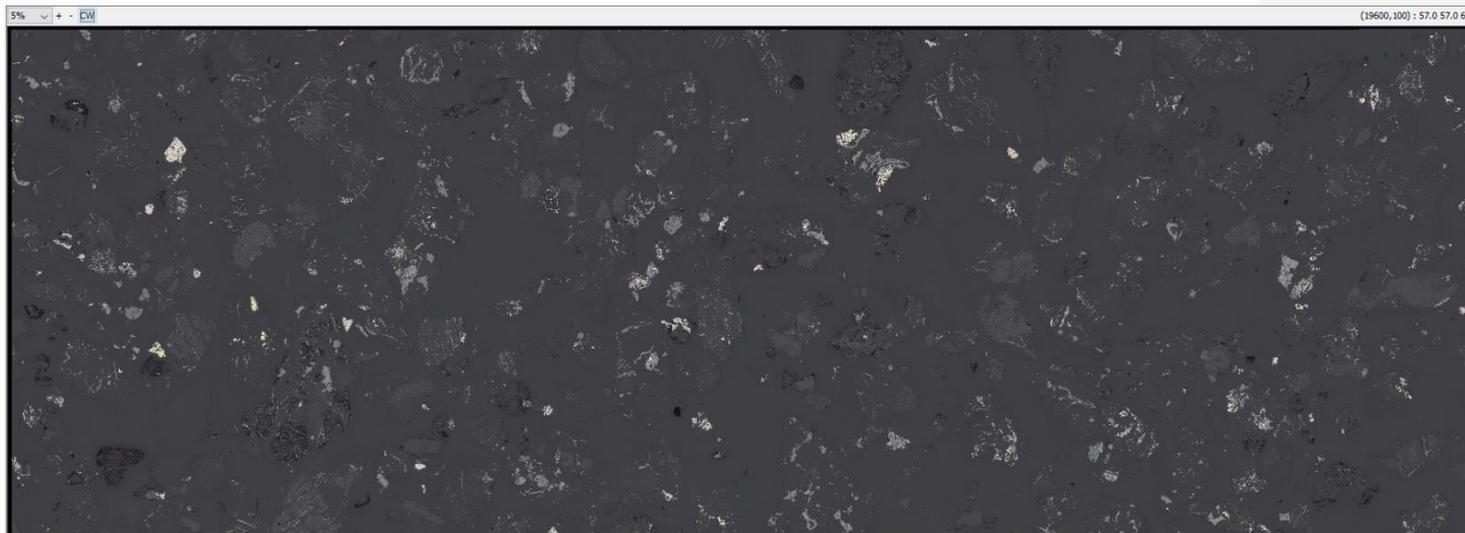
- Исходное сырье / Концентрат / Хвосты
- Буровой шлам (ротаторный и турбо)
- Керны
- Ручные пробы
- Пыль
- Переработанные/ обрабатываемые продукты
- Угольная пыль
- Твердые осадки
- Металлы и шлаки

- Эпоксидные блоки
- Малые частицы (пыль)
- Срезы горных пород
- Тонкие полированные секции (прозрачные шлифы)



СЪЕМКА И АНАЛИЗ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- ✓ Получение цифровой копии максимальной поверхности образца или требуемого фрагмента / фрагментов за минуты
- ✓ Автоматическая установка масштаба при переключении объективов
- ✓ Автоматическое воспроизведение условий съемки при смене объективов
- ✓ Запатентованная технология съемки из видеопотока позволяет получать и анализировать панорамы **БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЯ РАЗМЕРА**



Камера

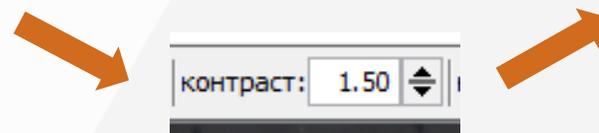
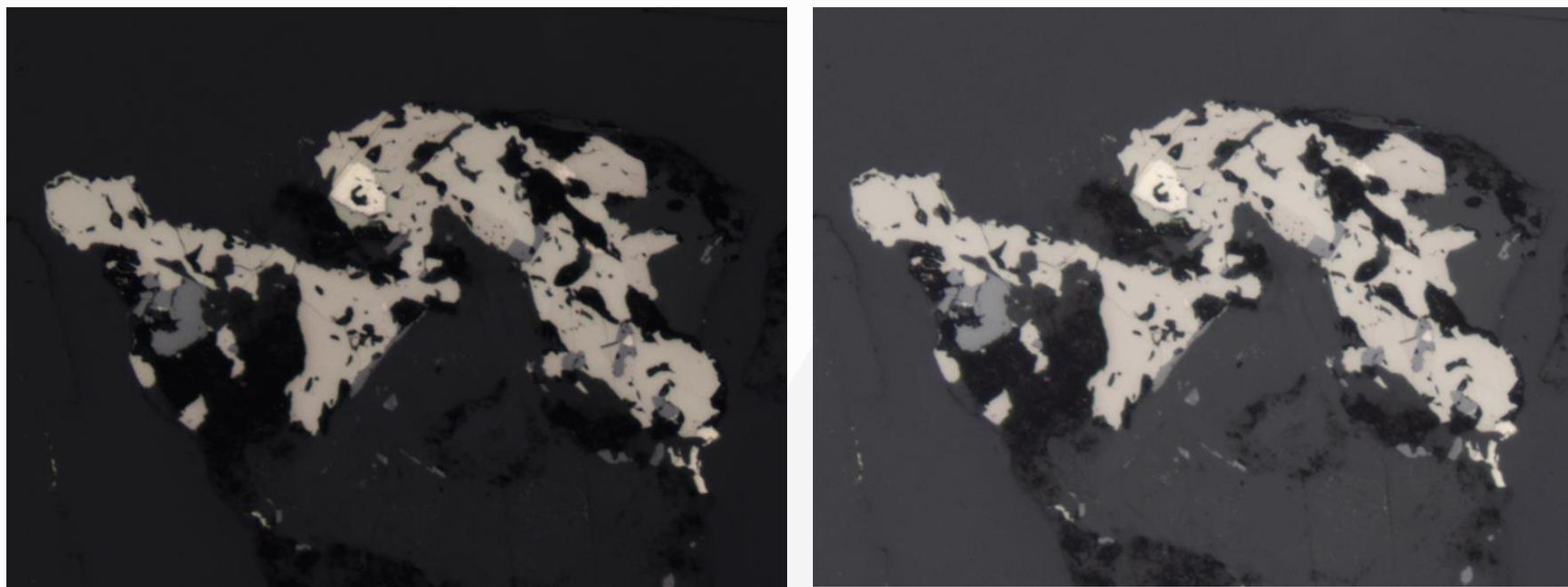
Экспозиция	<input type="text" value="2,2"/>
Усиление	<input type="text" value="0,0"/>
Автоэкспозиция	<input checked="" type="checkbox"/>
Уровень автоэкспозиции, %	<input type="text" value="22"/>
Гамма коррекция	<input type="text" value="1,00"/>
Уровень красного	<input type="text" value="1,51"/>
Уровень зеленого	<input type="text" value="1,00"/>
Уровень синего	<input type="text" value="1,53"/>
Автобаланс белого	<input checked="" type="checkbox"/>
Оттенки серого	<input checked="" type="checkbox"/>

Фокус >0<

Позиция, мкм

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА

В целях удобства визуализации для пользователя и компенсации эффекта «тёмного изображения» используется функция степенного гамма-контрастирования (справа). Максимум цветовой информации для автоматического анализа сохраняется на отдельном изображении (слева).



ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА

Программные средства утилиты съемки расширяют динамический диапазон камеры и повышают контрастность изображения. Несмотря на то, что изображение выглядит темным, оно максимально приспособлено и к визуализации, и к анализу.

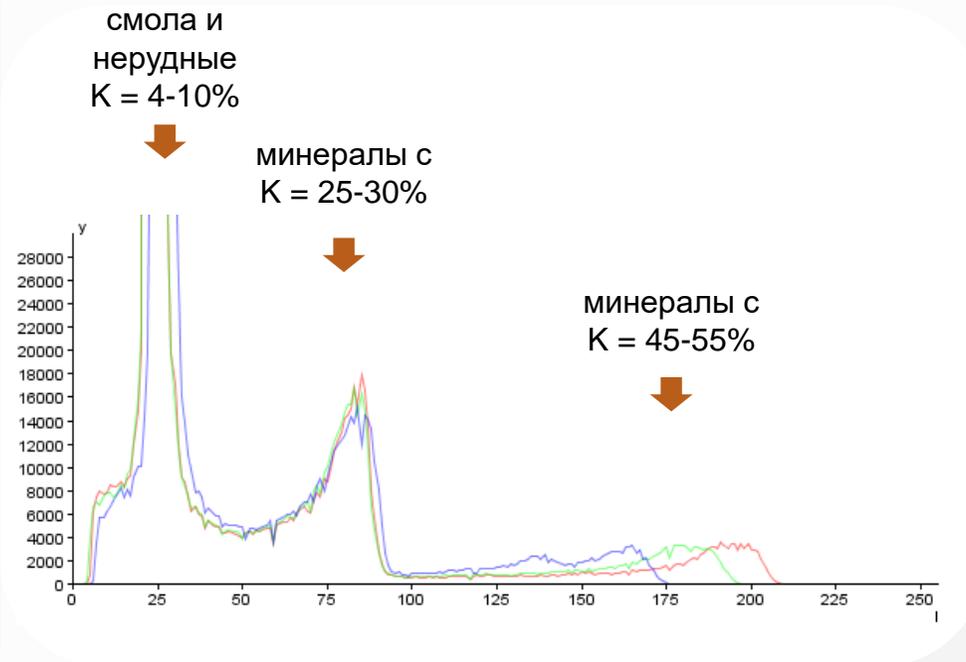
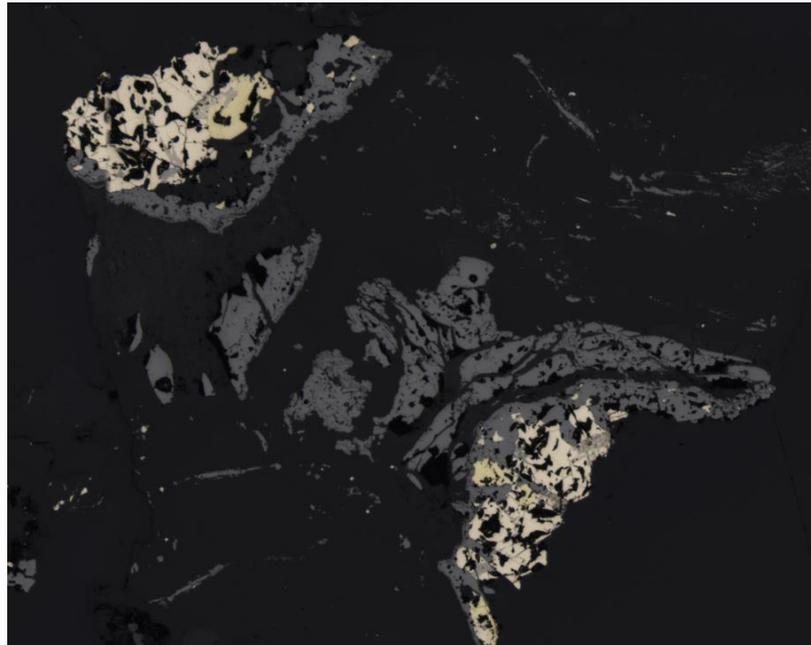


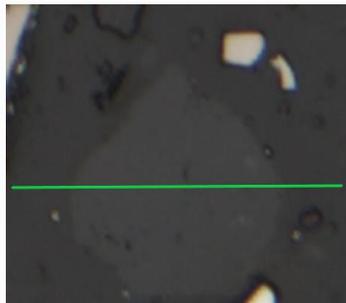
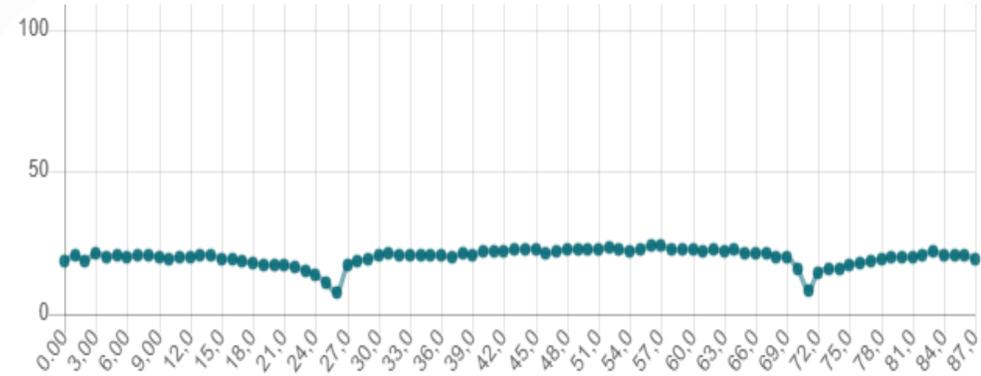
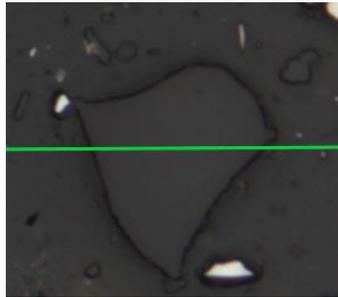
График распределения яркости цветов

К – коэффициент отражения.
Указаны пики для минералов:

- нерудные (К = 4-10%)
- сфалерит (К = 25-30%)
- пирротин, пентландит (К = 45-55%)

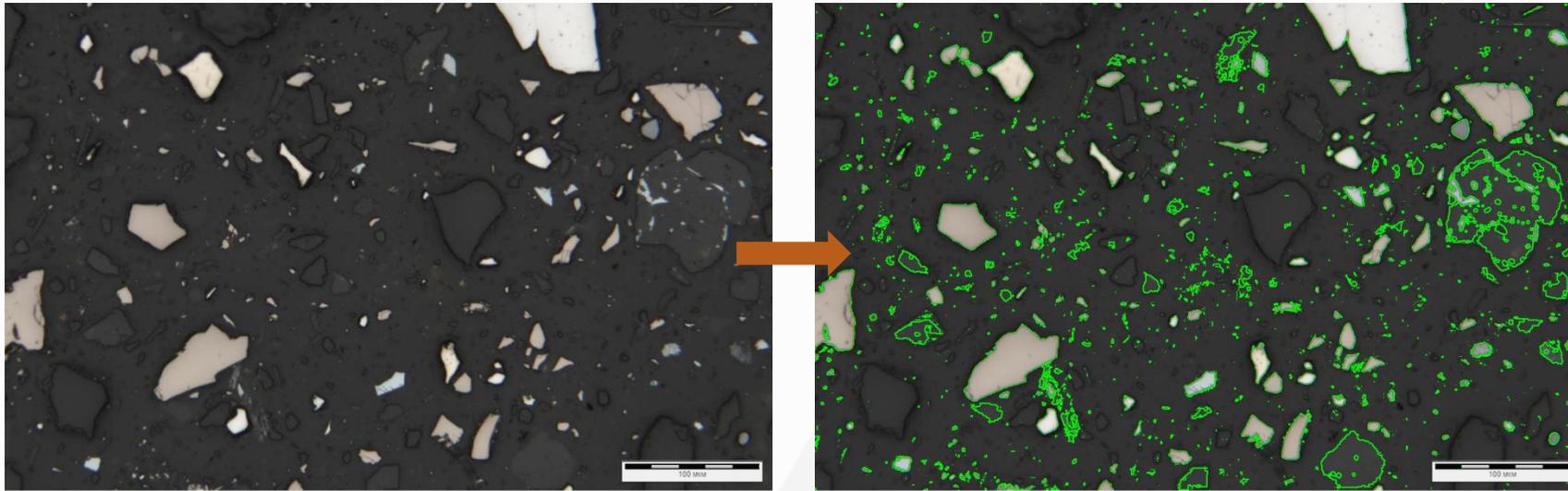
ПРОБЛЕМЫ МИКРОСКОПИИ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Яркость слабоотражающих зёрен незначительно отличается от яркости смолы. Ниже представлены графики яркости вдоль линии. Видно, что отличия могут быть не только по яркости, но и по вторичным признакам, например, рельефу вокруг зерна.



ПРОБЛЕМЫ МИКРОСКОПИИ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Из-за слабого контраста зёрен их выделение (сегментацию) невозможно автоматизировать каноническими методами пороговой сегментации.

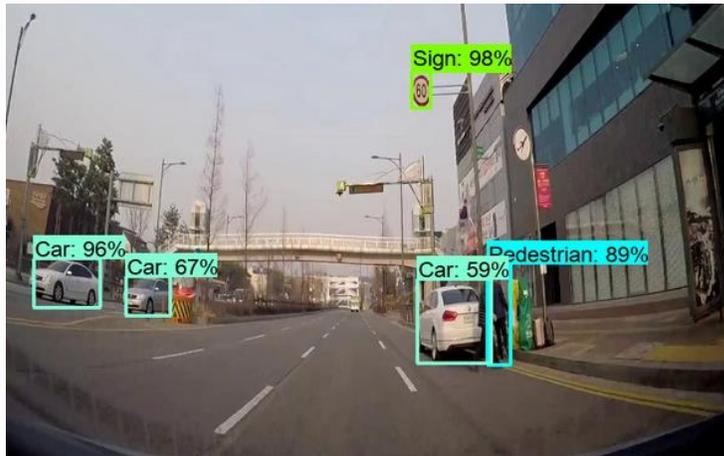


Некоторые зёрна (например, кальцита) – «чуть более яркие», чем смола.
Зёрна кварца внутри тела зерна практически неотличимы по яркости от смолы.
РЕШЕНИЕ: глубокое машинное обучение нейросети

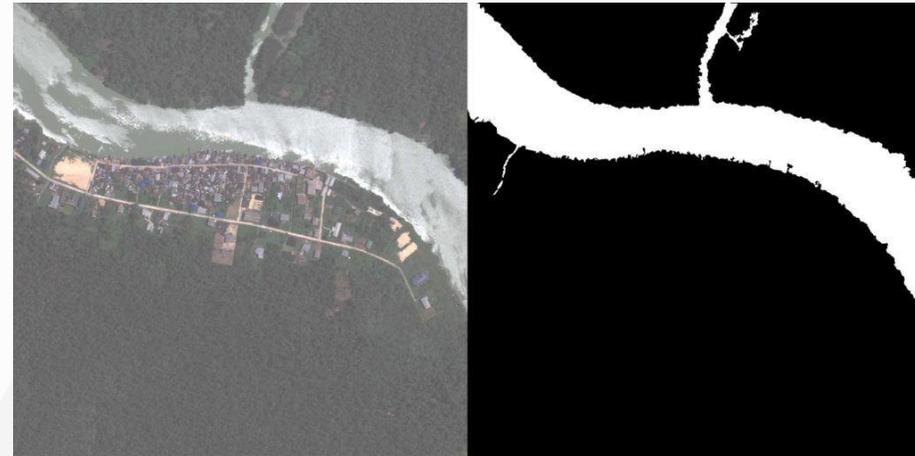
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

для сегментации слабоконтрастных минералов

Примеры применения нейронных сетей в обработке изображений:



Нейросети для поиска объектов
(Object Detection)



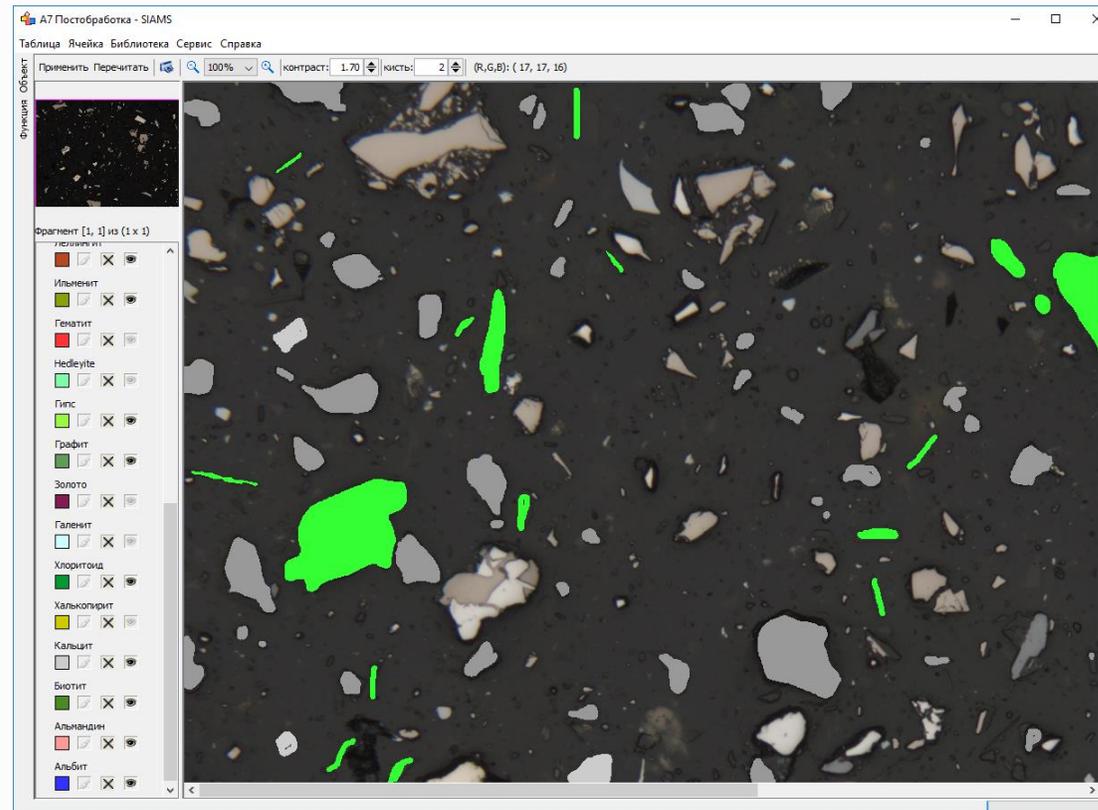
Нейросети сегментационные
(Image Segmentation)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

для сегментации слабоконтрастных минералов

- ✓ В ПО «Минерал С7» проведена разметка на предварительно обработанных 24-х полях зрения. проведен цикл глубокого машинного обучения из 100 эпох.

Получен обученный нейросетевой алгоритм для выделения (сегментации) слабоконтрастных нерудных минералов



Суммарные данные

Минерал	Масс. доля, %	Кол-во зёрен	
Пирит	9,56	270	1958
Арсенопирит	3,52	147	
Антимонит	1,34	71	
Бертьерит	2,68	224	
Пирротин	25,92	1192	
Сфалерит	0,17	54	
Рутил	0,08	10	3663
Кварц	35,97	2771	
Серицит	3,11	546	
Ильменит	0,02	6	
Кальцит	11,01	299	
Биотит	6,35	16	
Альмандин	0,04	2	
Альбит	0,25	13	

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

для сегментации слабоконтрастных минералов

Специализированное ПО SIAMS AIM для глубокого машинного обучения

Маяк (100x, 200x) копия 2

Объектов - 1

Типовой размер объекта: 128 px

Цветовое пространство: L - Только яркость

Сторона входного слоя нейросети: 64

Обучение: Продолжить обучение

Перекрытие тайлов при обучении: 1 / 8

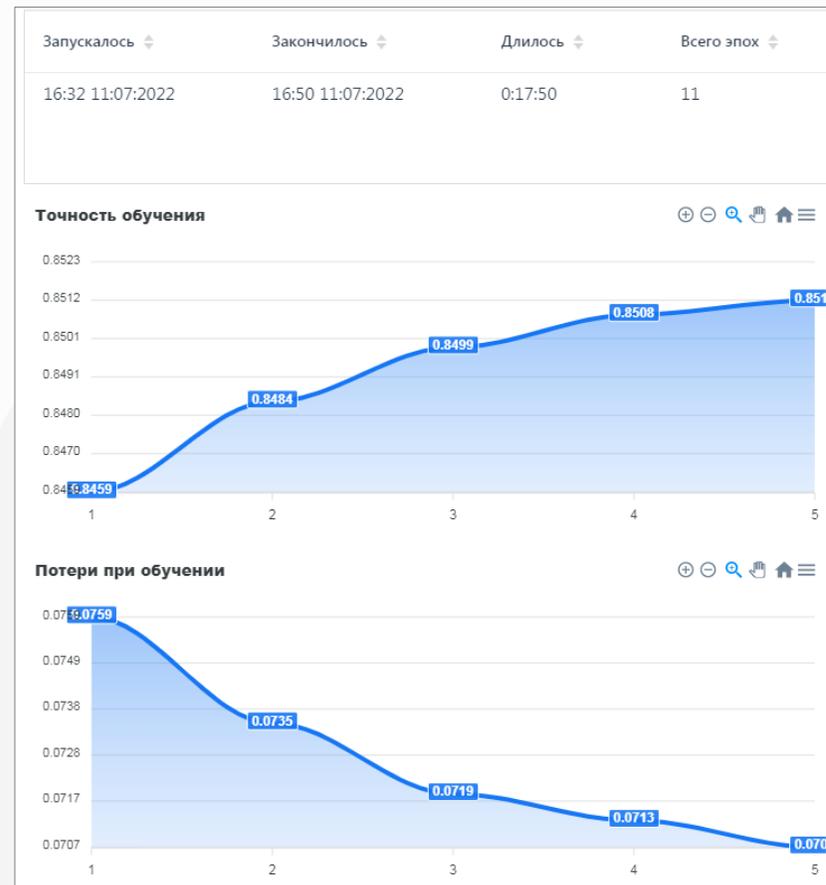
Способ сборки тайлов при обучении: Равномерно по площади

Эпох обучения: 5

Расширенные настройки

Описание модели

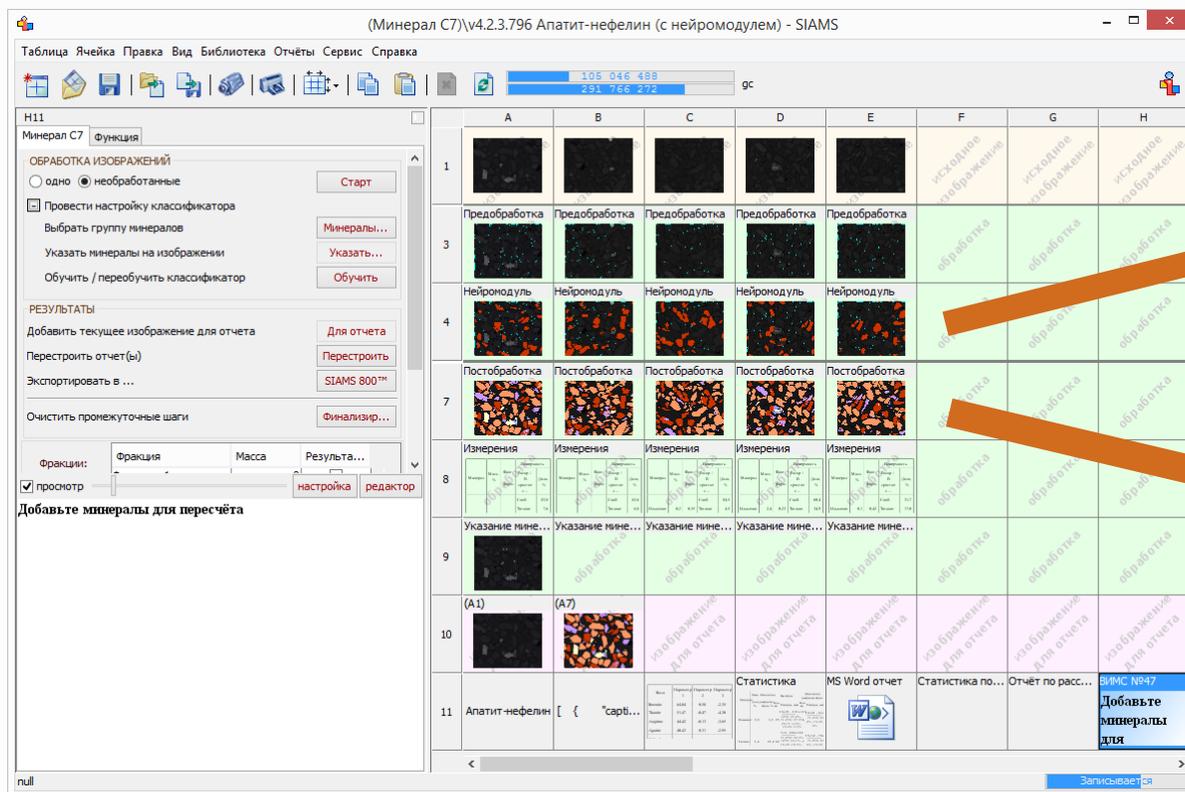
Сохранить Отменить



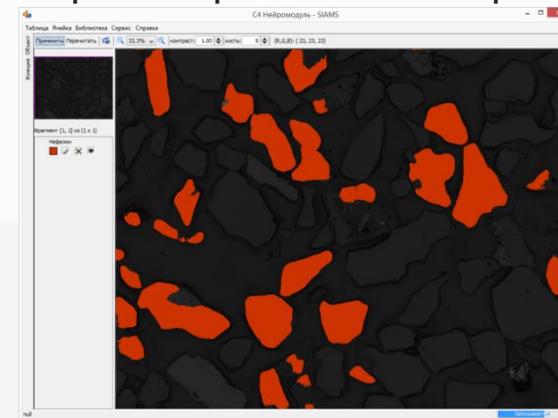
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

для сегментации слабоконтрастных минералов

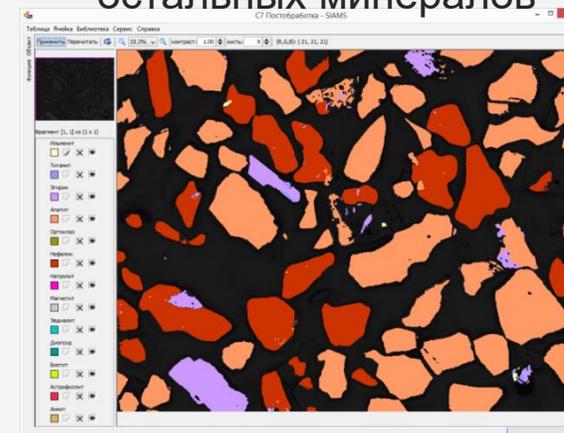
- Обученная нейронная сеть выделяет зерна нефелина, ПО «Минерал С7» выделяет остальные контрастные минералы



Зерна нефелина из нейросети

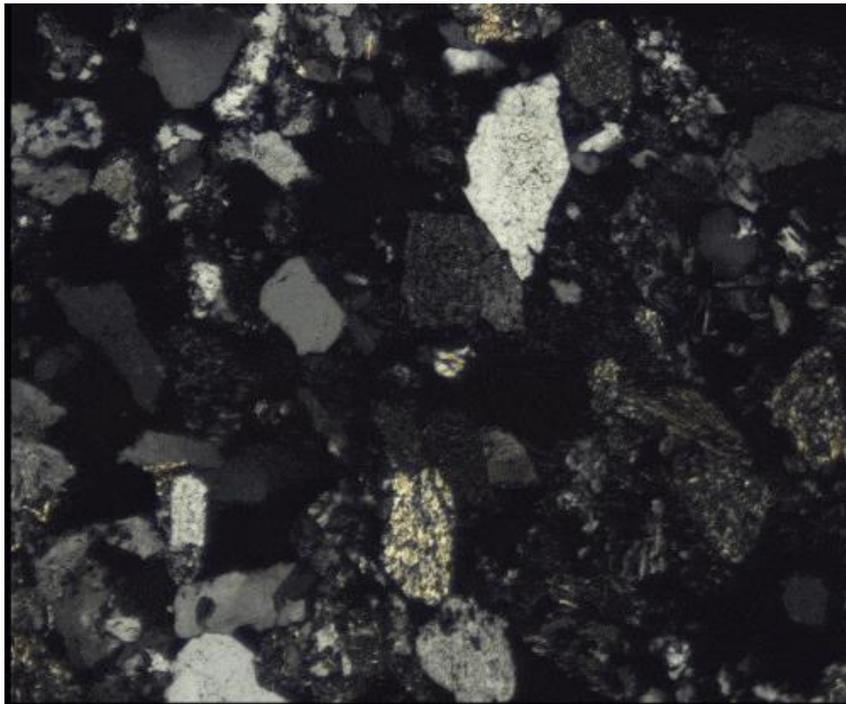


...добавляются к маске остальных минералов

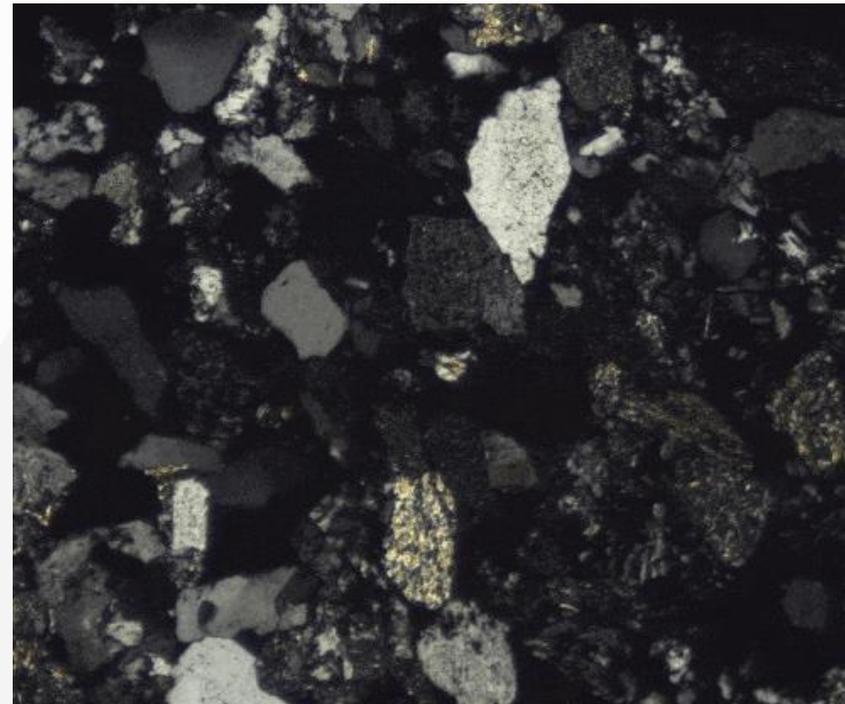


ПРОБЛЕМЫ МИКРОСКОПИИ ПРОХОДЯЩЕГО СВЕТА

Сегментация минералов на прозрачных шлифах усложняется за счет увеличения входных переменных параметров. В частности, каждая точка изображения шлифа в процессе вращения столика, либо скрещенных николей, претерпевает гармоническое изменение яркостных характеристик.



Синхронное вращение скрещенных николей



Вращение круглого столика

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СЪЕМКА МИНЕРАЛОВ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

- ✓ Определение диагностических признаков минералов в скрещенных николях на аншлифах и петрографических шлифах.

Определение характера погасания минералов и измерение угла погасания происходит с помощью автоматизированного синхронного поворота николей поляризатора и анализатора.

- ✓ Скрещенное и параллельное положение николей определяется автоматически. Формируется стек изображений поля зрения на разных углах поворота с автоматической центровкой стека по оптической оси.



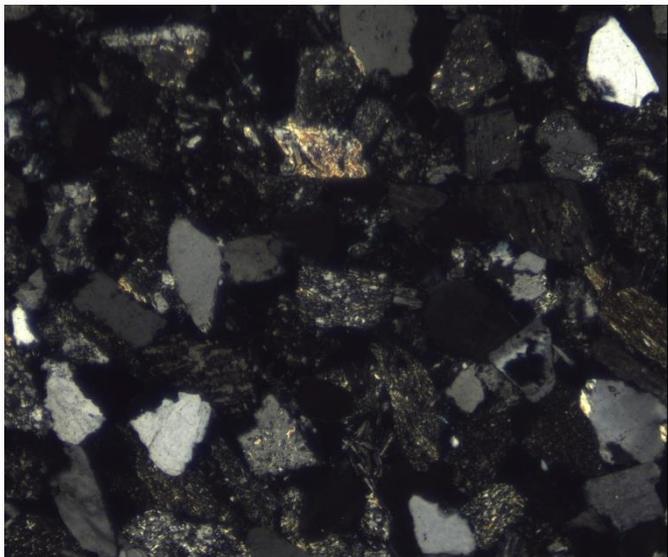
Комплект автоматизации для диагностических исследований минералов в поляризованном свете

- Привод поворотного поляризатора проходящего света (автовращение 360°)
- Привод поворотного анализатора (автовращение 360°)
- Программное управление углом поворота николей
- Автоматическое скрещивание николей
- Автоматическая центровка полей зрения

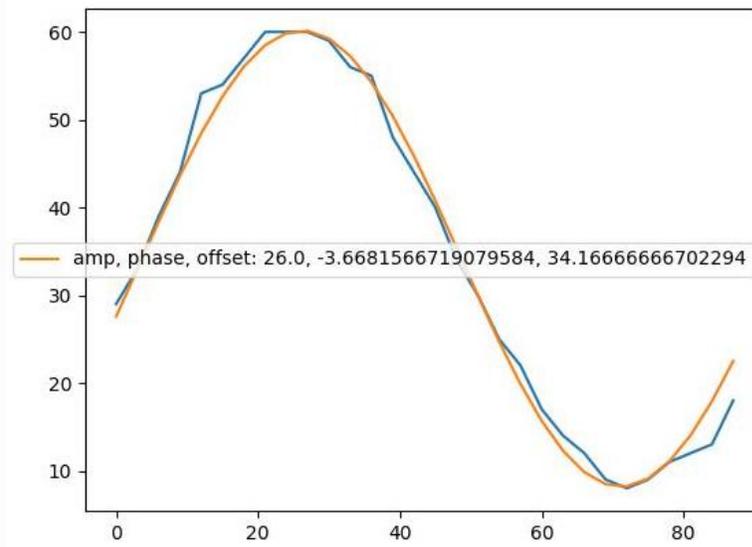
АВТОМАТИЧЕСКАЯ СЪЕМКА МИНЕРАЛОВ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Разработана автоматическая система вращения скрещенных николей с управлением из ПО «Минерал С7». Система автоматически формирует стэк из 89 изображений поля зрения с шагом в 1 градус или иным программно-заданным шагом угла поворота николей.

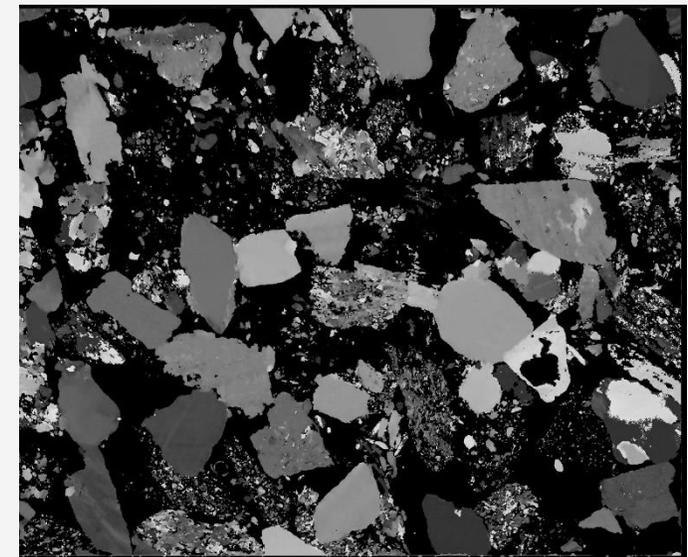
Для каждой точки этого стэка в ПО «Минерал С7» строится график поведения пиксела в каждой точке и, если этот пиксел изменяется по гармоническому закону, восстанавливаются параметры этого гармонического закона. С использованием предлагаемой технологии предполагается создание системы для программно-аппаратного определения угла погасания и диагностики типа минерала по этому признаку.



Исходное изображение в скрещенных николях (угол поворота 50°)



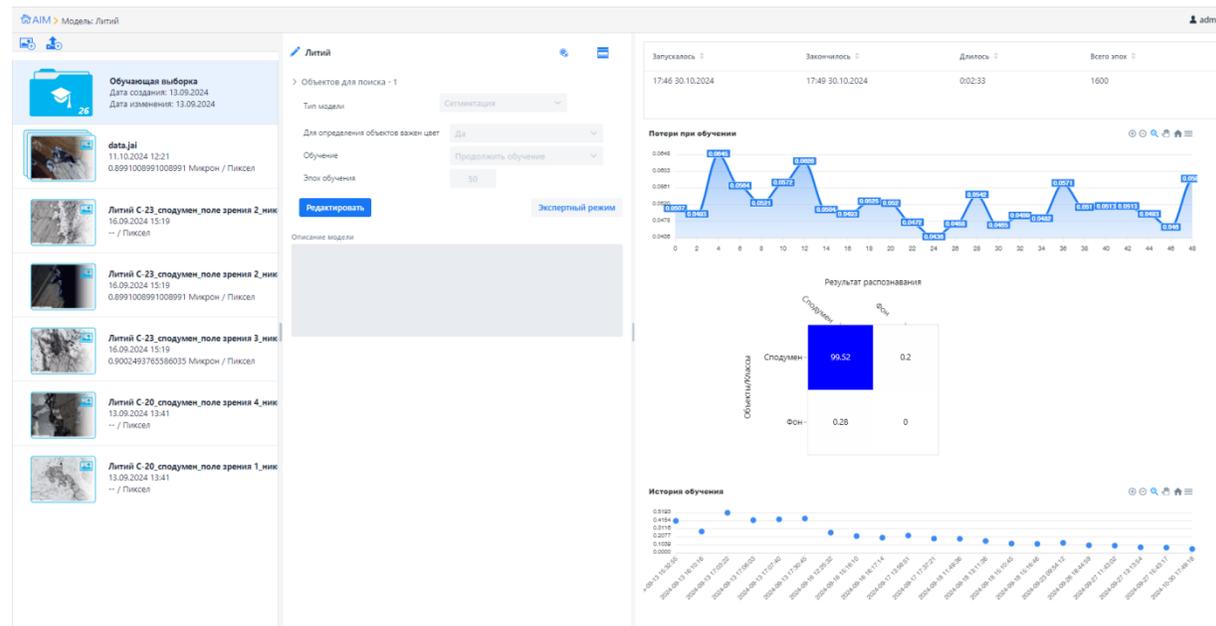
Гармоническая функция изменения яркостных характеристик точки на шлифе



Карта зерен, сегментированных по значению фазы (аргументу гармонической функции)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Нейромодели для сегментации минералов на изображениях при параллельных и скрещенных николях



✓ В петрографических шлифах на некоторых рудных и породообразующих минералах в ПО SIAMS AIM проведено обучение нейросети путём создания разметки искомых минералов в проходящем свете при параллельных и скрещенных николях.

На графиках loss функции и матрицы ошибок отслеживается корректность распознавания нейросетью объектов. График истории обучения является сводным loss функции и демонстрирует прогресс обучения нейромодуля.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Программное решение с нейромодулями для определения количественного содержания компонента на примере сподумена

The screenshot displays the SIAMS 900 software interface. On the left is a gallery of project thumbnails with their respective dates and titles. The main area shows a large image of a wood cross-section with a segmentation mask overlaid. The right panel displays the analysis results for a specific project.

Создать новый проект

Поиск

10:10 | 24.10.2024
Галерея
Размер: 3200x2200 (32 MB), 7.04 мм²
Масштаб изображения: Разные масштабы
Источник данных: A

09:45 | 14.10.2024
2024.10.14 09:45:25
Размер: 3200x2200 (20 MB), 5.69 мм²
Масштаб изображения: 5x
Источник данных: A

09:45 | 14.10.2024
2024.10.14 09:45:00
Размер: 3200x2200 (20 MB), 5.69 мм²
Масштаб изображения: 5x
Источник данных: A

11:37 | 11.10.2024
Литий С-24_сподумен_поле зрения 2_
Размер: 3200x2200 (2 MB), 5.70 мм²
Масштаб изображения: -
Источник данных: A

11:13 | 11.10.2024
Литий С-24_сподумен_поле зрения 2_
Размер: 3200x2200 (5 MB), 11.39 мм²
Масштаб изображения: Разные масштабы
Источник данных: A

12:14 | 08.10.2024
Галерея
Размер: 3200x2200 (10 MB), 15.59 мм²
Масштаб изображения: Разные масштабы
Источник данных: A

11:30 | 08.10.2024
Галерея
Размер: 3200x2200 (6 MB), 5.69 мм²
Масштаб изображения: -
Источник данных: A

← Назад 15.11.2024 | 12:34
Разработка. Анализ с помощью нейро-сетей
Литий

Настройки Редактирование Результаты

Отчёт

Результаты анализа

Параметр	Значение
Количество изображений (кадров)	2
Проанализированная площадь, мм²	11.39
Литий (площадь, мм²)	9.097
Литий (доля, %)	79.8

Статистика по 1 полю зрения
Статистика по 2 полю зрения

1 мм

х: 284.0 у: 352.4 Увеличение: (50%) Цвет: RGB(28, 17, 21, 255);

Загрузить

Применить

✓ В ПО SIAMS 900 выполнена сегментация сподуменов на изображениях в параллельных и скрещенных николях одновременно.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Программное решение с нейромодулями для определения количественного содержания компонента на примере сподумена

SIAMSA AIM Методики анализа

← Назад 15.11.2024 | 12:34

Разработка. Анализ с помощью нейро-сетей
Литий

Настройки Редактирование Результаты

Отчёт

Результаты анализа

Параметр	Значение
Количество изображений (кадров)	2
Пронализированная площадь, мм ²	11.39
Литий (площадь, мм ²)	9.097
Литий (доля, %)	79.8

Статистика по 1 полю зрения
Статистика по 2 полю зрения

Слой

- Литий C-24_сподумен_поле зрения
- 2_николи 1_jpeg
- Аннотации
- Литий
- Области для анализа
- Области для отчёта

Скрыть все слои

Применить

х: 498.0 у: 238.4 Увеличение: (50%) Цвет: RGB(159, 159, 161, 255);

Загрузить

✓ Сподумен, сегментированный нейросетью. Изображение в параллельных николях.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Программное решение с нейромодулями для определения количественного содержания компонента на примере сподумена

SIAMSA AIM Методики анализа

← Назад 15.11.2024 | 12:34

Разработка. Анализ с помощью нейро-сетей
Литий

Настройки Редактирование Результаты

Отчёт

Результаты анализа

Параметр	Значение
Количество изображений (кадров)	2
Проанализированная площадь, мм ²	11.39
Литий (площадь, мм ²)	9.097
Литий (доля, %)	79.8

Статистика по 1 полю зрения
Статистика по 2 полю зрения

Слои

- Литий C-24_сподумен_поле зрения 2_николи 2.jpg
- Литий
- Области для анализа
- Аннотации
- Области для отчёта

Скрыть все слои

Применить

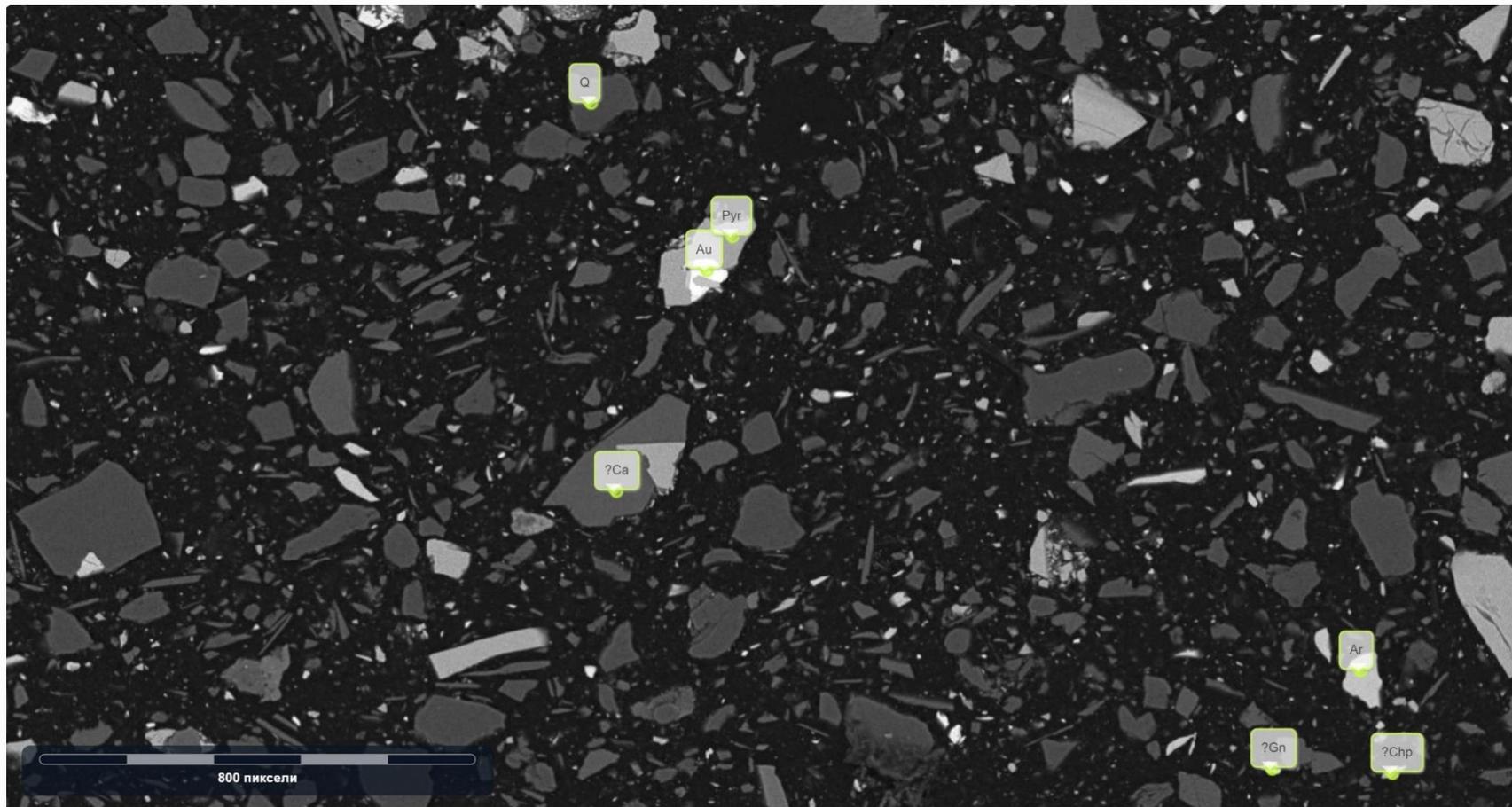
х: 999.0 у: 224.4 Увеличение: (50%) Цвет: RGB(185, 79, 62, 255);

Загрузить N1 N2

✓ Сподумен, сегментированный нейросетью. Изображение в скрещенных николях.

ПРОБЛЕМЫ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Метод, при котором для анализа одного и того же образца используются несколько различных методов световой или электронной микроскопии, дающих качественно различную и взаимодополняющую информацию на одном и том же участке исследуемого образца.



- ✓ Оптическая микроскопия. Метод светлого поля в отраженном свете
- ✓ Сканирующая электронная микроскопия. Съёмка детектором обратно отражённых электронов (BSE)

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

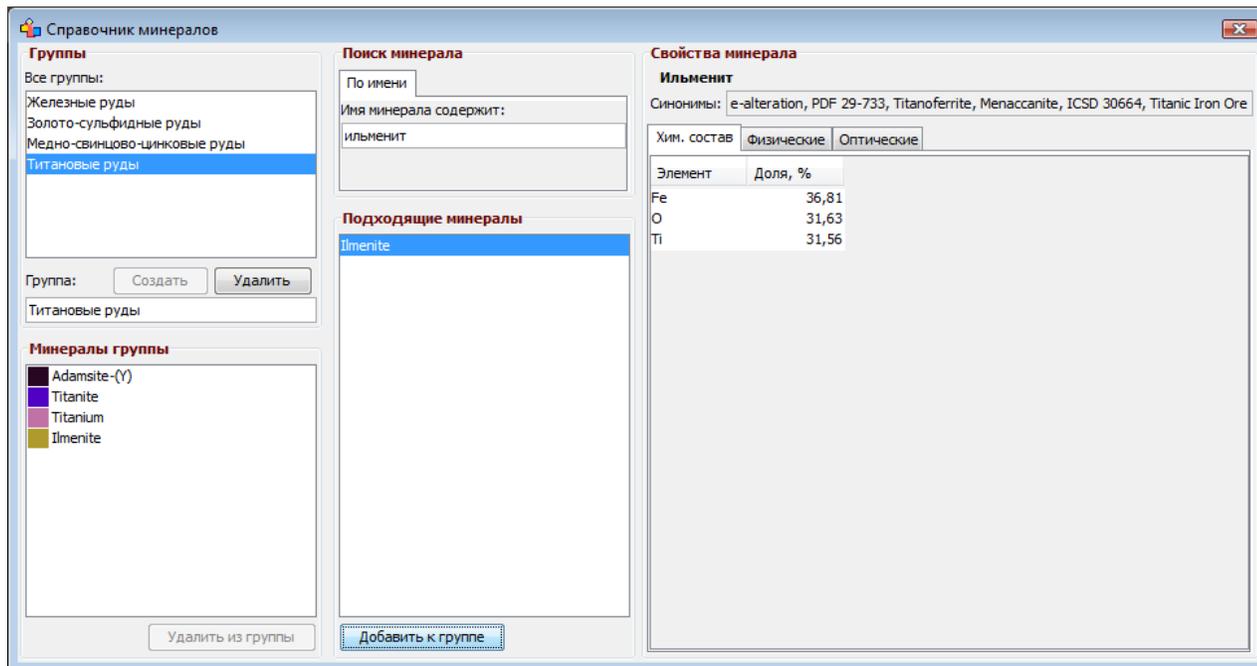
В ПО «МИНЕРАЛ С7»

Анализ зёрен минералов:
массовая доля, раскрытие, распределение по размеру

Минерал	Массовая доля, %	Раскрытие, %	Все зёрна		Своб. зёрна	
			Кол-во	Размеры, мкм	Кол-во	Размеры, мкм
Пирит	19,2	47,4	1137	1x1 - 41x87 45-60=30,5%, 30-45=26,7%, 60-90=23,0%, 20-30=13,2%, 10-20=6,2%, 3-10=0,5%, 0-3=0,0%	634	1x1 - 41x87 45-60=29,0%, 30-45=25,5%, 60-90=19,8%, 20-30=16,5%, 10-20=8,5%, 3-10=0,7%, 0-3=0,0%
Галенит	13,4	43,7	2402	1x1 - 25x66 10-20=28,8%, 20-30=25,8%, 30-45=18,5%, 60-90=11,2%, 3-10=10,4%, 45-60=5,4%, 0-3=0,0%	1249	1x1 - 41x63 10-20=40,6%, 20-30=19,4%, 3-10=18,1%, 30-45=11,3%, 60-90=10,6%, 0-3=0,0%
Халькопирит	25,3	34,8	6416	1x1 - 62x181 90-∞=25,0%, 60-90=23,0%, 45-60=16,5%, 30-45=15,7%, 20-30=9,7%, 10-20=7,0%, 3-10=3,2%, 0-3=0,0%	4059	1x1 - 87x134 90-∞=23,6%, 60-90=16,1%, 10-20=14,1%, 20-30=13,8%, 45-60=11,7%, 30-45=11,7%, 3-10=9,0%, 0-3=0,0%
Сфалерит	42,1	60,8	14201	1x1 - 32x131 30-45=28,0%, 45-60=23,1%, 60-90=16,1%, 20-30=14,9%, 10-20=8,3%, 90-∞=7,0%, 3-10=2,5%, 0-3=0,1%	11615	1x1 - 32x131 30-45=27,9%, 45-60=20,2%, 20-30=17,4%, 10-20=11,7%, 90-∞=9,7%, 60-90=9,1%, 3-10=3,7%, 0-3=0,2%

РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В ПО «МИНЕРАЛ С7»

- ✓ Используя данные из встроенного справочника минералов выполняется автоматический пересчёт содержания минералов в содержание химических элементов в минеральном сырье.



Пример для полиметаллической руды
(пирит + галенит + халькопирит + сфалерит)

Минерал	S, %	Pb, %	Fe, %	Cu, %	Zn, %
Галенит	1,0	6,2	-	-	-
Кубанит	0,5	-	0,6	0,3	-
Халькопирит	3,6	-	3,2	3,6	-
Сфалерит	14,3	-	1,2	-	27,7
Пирит	20,2	-	17,6	-	-
Итого, %	39,6	6,2	22,6	3,9	27,7

ВЫВОДЫ

- ✓ Использование современных компьютерных технологий, в том числе глубокого машинного обучения, реализованных в Анализаторе «Минерал С7», повышают производительность оптико-геометрического анализа минерального сырья.

КОНТАКТЫ ДЛЯ СОТРУДНИЧЕСТВА

☎ +7 343 379 00 34 🔗 <https://siams.com/>

📍 Екатеринбург, Коминтерна, 16, офис 604