

УДК 552.086

**КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ
ФОСФАТОВ В ПЕСЧАНИКАХ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ НАВАЙ (ВЕНЕСУЭЛА)**

В. П. Самодуров, А. А. Калина, С. А. Ковалевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, vladimirsamodurov1946@gmail.com,
aleksandrkalina2006@gmail.com, sofiya.kovalevich2005@gmail.com*

Рассмотрены основные типы фосфатных руд и их физико-механические свойства, определяющие эффективность их обогащения. Разработана программа количественного определения содержания франколитовых пеллет в песчаниках фосфоритового месторождения Навай.

Ключевые слова: фосфатные руды; анализ франколита.

**QUANTIFICATION PHOSPHATE CONTENT
IN SANDSTONES NAVAI FIELDS (VENEZUELA)**

V. P. Samodurov, A. A. Kalina, S. A. Kovalevich

*Belarusian State University, Nezavisimosti Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus,
vladimirsamodurov1946@gmail.com, aleksandrkalina2006@gmail.com,
sofiya.kovalevich2005@gmail.com*

The main types of phosphate ores and their physical and mechanical properties, which determine the efficiency of their enrichment, are considered. A computer program has been developed for the quantitative determination of the content of francolite pellets in the sandstones of the Navai phosphorite deposit.

Keywords: phosphate ores; francolite content determination.

Природные фосфаты являются сырьем для производства фосфатных удобрений, фосфора, фосфорной кислоты. Фосфор также применяется в металлургии, процессах производства стекла и керамики. Фосфаты добывают из трех основных горных пород: апатитов, фосфоритов и франколитов. Апатиты встречаются в фойдолитах – щелочных ультраосновных плутонических породах, а также в карбонатитах [1]. Здесь они представлены шестигранными удлинёнными монокристаллами или в виде сахаровидных агрегатов. В осадочных породах распространены фосфориты, которые представлены черными сферолитовыми конкрециями, с лучистым

внутренним строением [2]. Франколит распространен в песчаных осадках в виде сферических или удлинённых гранул (пеллет). Обычно в центре пеллеты содержится микрористалл кварца, на который нарастают микро-слои биогенного вещества в условиях мелководной волноприбойной зоны.

Апатит, фосфорит и франколит различаются по размерам, физическим и механическим параметрам, которые существенно влияют на процессы обогащения фосфатных руд. Франколит представляет собой богатую карбонатами разновидность минерала фторапатита. Он имеет переменный химический состав, который может быть представлен $(Ca, Mg, Sr, Na)_{10}(PO_4, SO_4, CO_3)_6F_{2-3}$ [3]. Франколит минерал непрозрачный, с низкой твёрдостью – 5, плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$ или менее в землистых разностях – пеллетах. Пеллеты распространены в песчаниках прибрежных морских образований в ассоциации с кварцевыми зёрнами. Поэтому в процессе обогащения фосфатов на этапе дробления и помола исходной породы пеллеты легко разрушаются, затрудняя процессы обогащения.



Рис. 1. Кристаллы апатита размером 0,5–1,0 см *a*) [1], фосфорит лучистого строения размером 4,5 см *б*) по [2], пеллеты франколита размером 80 и 40 мкм *в*) [4], шлиф фосфатной породы месторождения Навай (Венесуэла), размер поля зрения 2,5 мм *г*)

На рис. 1г представлена микрофотография фосфатной породы месторождения Навай (Венесуэла), представленной для исследований В. Э. Кутырло. Эта микрофотография используется здесь как пример при разработке методического подхода компьютерного определения количественного содержания фосфатов в рудах месторождения Навай.

Количественное определение содержания минералов в составе изучаемой породы обычно выполняется с помощью программного комплекса Fiji (ImageJ), предназначенного для исследований цифровых фотографий. Однако для выполнения аналитической процедуры предварительно необходимо выделить изучаемый минерал в составе горной породы. Для этого обычно используют операцию «Цветной порог» (Color Threshold), но в дисперсных поликомпонентных породах параметры цветов разных минералов перекрываются, что препятствует их выделению (рис. 2).

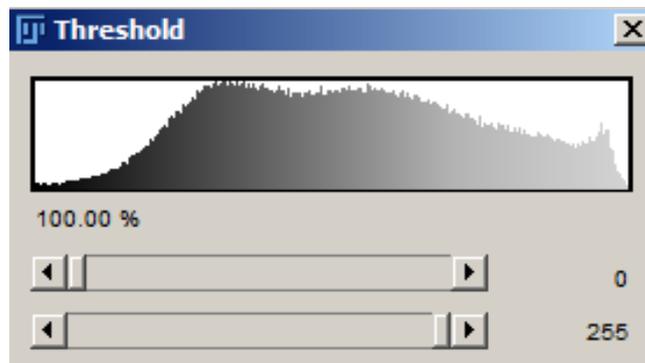


Рис. 2. Распределение параметра «яркость» микрофотографии 1г

Сегментацию минеральных компонентов также выполняют с помощью программ машинного обучения (ML). В составе программного комплекса Fiji присутствует плагин Trainable Weka Segmentation. Он также эффективен для минеральных зерен с существенными различиями параметров цветности, но в условиях перекрытия этих параметров результаты сегментации бывают неудовлетворительными.

Нами разработана программа выделения минеральных зерен в условиях перекрытия цветовых параметров минералов в шлифах горных пород (рис. 3). Особенностью изучения шлифов горных пород в петрографическом микроскопе является возможность оптической идентификации минералов, основываясь на их кристаллооптических характеристиках.

В окне программы представлены две одинаковые микрофотографии шлифа изучаемой породы. Левая микрофотография служит для сравнения результатов определения франколита. Выделение франколита выполняется на правой микрофотографии. После щелчка мыши по изучаемому

зерну франколита значения цветности в цветовом пространстве RGB выводятся в окна Edit, со значениями «Красный», «Зеленый», «Синий». Кнопка Button «Применить» запускает процесс поиска аналогичных цветов по всей поверхности микрофотографии с окном ± 10 . Франколит здесь выделяется желтым цветом, а его содержание можно определить кнопкой «Содержание». Можно видеть большое разнообразие размеров частиц франколита, при этом дисперсные частицы составляют здесь подавляющее большинство. Общее содержание франколита в изучаемом шлифе составляет 23,7 %.

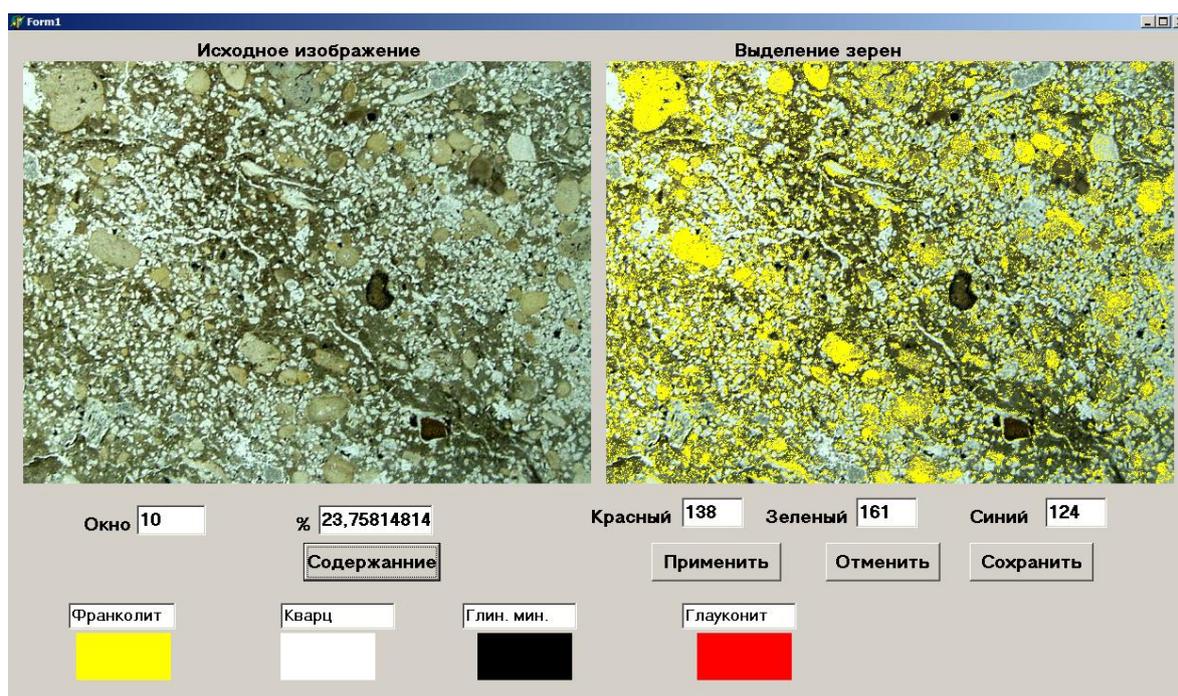


Рис. 3. Результат выделения пеллет франколита в шлифе фосфатных пород месторождения Навай (Венесуэла)

Дополнительные количественные данные можно получить с помощью программного комплекса Fiji. Подготовка микрофотографии к анализу включает операцию «Цветной порог», выделяя франколит по жёлтому цвету. Преобразование изучаемой микрофотографии в бинарное изображение выполняется операцией $Fiji > Color Threshold$, а затем $Fiji > Process > Binary > Fill Holes$. В результате франколит выделяется чёрными зёрнами на белом фоне, а бинарное изображение становится пригодным для анализа частиц (рис. 4).

Обобщенные параметры анализа: общее число частиц франколита на микрофотографии — 8743, при этом содержание франколита составляет 25,86 %. Некоторое увеличение этого параметра связано с применением

операции «Заполнить пустоты» (Fill Holes). Параметр «Округлость» (Circularity) составляет 0,83, что связано с условиями формирования пеллет франколита — процессами окатывания в волноприбойной зоне. Плотность пеллет (Solidity) достигает 0,86, так как окатыши франколита постепенно накапливают микрочастицы органического вещества.

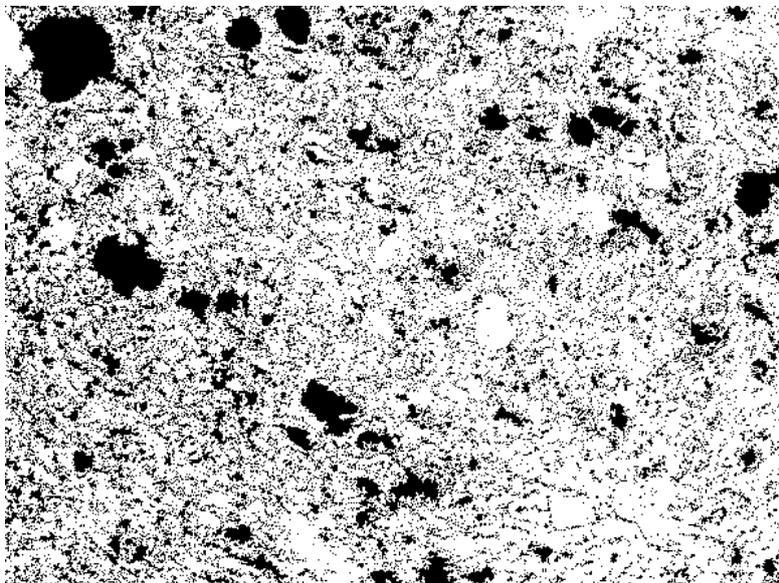


Рис. 4. Бинарное изображение, на котором франколит выделен черным цветом, является исходным для выполнения количественного анализа фосфатов

Заключение. Разработанный подход определения дисперсного франколита месторождения Навай (Венесуэла) позволяет выполнить анализ содержаний дисперсных фосфатных пеллет в условиях перекрытия параметров цветности минералов в составе породы.

Библиографические ссылки

1. Апатит – «обманщик» с доброй душой [Электронный ресурс]. URL: <https://mineralpro.ru/gems/apatite> (дата обращения: 09.03.2024).
2. Описание фосфорита. Свойства фосфорита. Применение фосфорита [Электронный ресурс]. URL: <https://tvoi-uvelirr.ru/opisanie-fosforita-svoystva-fosforita-primenenie-fosforita> (дата обращения: 09.03.2024).
3. Francolite [Электронный ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Francolite> (дата обращения: 09.03.2024).
4. *Salim Boulemia, Messaoud Hamimed, Salah Bouhlef, Jaloul Bejaoui.* Petro-Mineralogical Analysis of Sedimentary Phosphate of Marine Origin, Case of the Locality of El Kouif (Algerian-Tunisian Confines) // *Open J. of Geol.* 2015. Vol. 5 No. 3. P. 146–173.