

## ЦИФРОВАЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ПЕТРОГРАФИЯ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

В. П. САМОДУРОВ<sup>1)</sup>, Е. А. ВАСИЛЁНОК<sup>1)</sup>, Ю. Н. ЕЛЕНСКИЙ<sup>2)</sup>, А. М. ЕРОХОВЕЦ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белгортхимпром, пр. Машерова, 17, 220029, г. Минск, Беларусь

Обобщены методические подходы и результаты флуоресцентной макро- и микропетрографии горных пород. Известно, что флуоресценцию минералов вызывают не их макроэлементы, а примеси (активаторы). В результате использовать флуоресценцию для идентификации минералов из разных месторождений не представляется возможным, так как активаторы в этом случае неодинаковы. Однако в пределах одного месторождения флуоресценция является надежным типоморфным признаком, поскольку минералы с данными флуоресцентными характеристиками имеют единый источник формирования. Обсуждаемый методический подход основан на комбинации эпифлуоресцентной микроскопии и мультифокальной петрографии пород. Ультрафиолетовое исследование в режиме «на отражение» имеет ряд преимуществ, особенно при изучении дисперсных осадочных пород: улучшение разрешения микрофотографий, отсутствие перекрытия микрочастиц внутри шлифа при исследовании его «на просвет». В отличие от классической петрографии, в которой используется свет от источника освещения, в ультрафиолетовой петрографии флуоресцирующие минералы сами излучают свет, что также повышает разрешающую способность данного метода. Ультрафиолетовые исследования, выполненные на образцах пород надсолевой верхнедевонской толщи Старобинского месторождения калийных солей, выявляют полигенные процессы формирования этих пород. В составе терригенного материала алевритовой размерности выделяются минералы с малым и большим выходом флуоресценции, поступавшие в бассейн седиментации из разных источников. Основная масса мергелей, состоящая из дисперсного кальцита и глинистых минералов, в ультрафиолете демонстрирует структуры, невидимые для других методов исследования осадочных пород, – колломорфное агрегатное строение, зоны низкотемпературного метасоматического замещения агрегатов мергеля, связанных с системой трещиноватости пород. Флуоресцентные свойства гидротермальных и хемогенных минералов позволяют эффективно обнаруживать эти минералы в составе нормально-осадочных пород. Примером могут служить бораты в солях эвапоритовых формаций. Однако для установления минеральной разновидности таких образований требуется комплексный подход с использованием рентгенофлуоресцентного и дифрактометрического анализа.

**Ключевые слова:** флуоресценция минералов; мультифокальная петрография; эпифлуоресцентная микроскопия; комплекс методов исследования; низкотемпературные гидротермальные процессы.

### Образец цитирования:

Самодуров ВП, Василёнок ЕА, Еленский ЮН, Ероховец АМ. Цифровая ультрафиолетовая петрография: методические подходы и приложения. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2020;1:86–94. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-86-94>

### For citation:

Samodurov VP, Vasilionak AA, Yalenski YuN, Erohovets AM. Digital ultraviolet petrography: approaches and applications. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2020;1:86–94. Russian. <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-86-94>

### Авторы:

**Владимир Петрович Самодуров** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент; доцент кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики.

**Елена Анатольевна Василёнок** – аспирантка кафедры региональной геологии факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – В. П. Самодуров.

**Юрий Николаевич Еленский** – ведущий инженер научно-исследовательского геолого-экологического отдела.

**Анастасия Михайловна Ероховец** – инженер 1-й категории научно-исследовательского геолого-экологического отдела.

### Authors:

**Vladimir P. Samodurov**, PhD (geology and mineralogy), docent; associate professor at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.

[vladimir\\_samodurov@tut.by](mailto:vladimir_samodurov@tut.by)

**Alena A. Vasilionak**, postgraduate student at the department of regional geology, faculty of geography and geoinformatics.

[manul1994@mail.ru](mailto:manul1994@mail.ru)

**Yuriy N. Yalenski**, leading engineer at the geology-ecological scientific-research department.

[jelenskiy@bmci.by](mailto:jelenskiy@bmci.by)

**Anastasia M. Erohovets**, engineer of the 1<sup>st</sup> category at the geology-ecological scientific-research department.

[erohovetsa@gmail.com](mailto:erohovetsa@gmail.com)

DIGITAL ULTRAVIOLET PETROGRAPHY:  
APPROACHES AND APPLICATIONSV. P. SAMODUROV<sup>a</sup>, A. A. VASILIONAK<sup>a</sup>, Yu. N. YALENSKI<sup>b</sup>, A. M. EROHOVETS<sup>b</sup><sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus<sup>b</sup>Belgorkhimprom, 17 Mašeraŭ Avenue, Minsk 220029, Belarus

Corresponding author: V. P. Samodurov (vladimir\_samodurov@tut.by)

Integrated data on the approaches and applications of the rock fluorescent macro- and micropetrography is presented. Fluorescence in minerals is caused not by the major chemical elements but a wide range of chemical impurities (activators). As a result, fluorescence cannot be used for the mineral identification in the different deposits because of the different activators prevailing in the different localities. Nevertheless, fluorescence is the reliable typomorphic feature because the minerals with specific fluorescence forms in the same geochemical condition. This methodical approach is based on the combination of the epifluorescent microscopy and multifocal petrography of the rocks. Ultraviolet (UV) investigations by the reflectance microscopy method reveal some advantages, mostly in the sedimentary rocks studying – improving an optical resolution of the images, avoiding the microparticles overlapping inside the thin sections. On the contrary to the classical petrography which uses light source, fluorescent minerals are the source of light themselves, and this feature improves the optical resolution of this method as well. Ultraviolet investigations of the samples of Starobin Upper-Devonian bed reveal polygenic processes of their forming. Silt-sized minerals with the different fluorescence features, small and high quantum yields, have been brought from the different sources. Prevailing marls, consisting of the clay minerals and dispersed calcite reveal invisible for the other methods structures – colloform aggregates, metasomatic replacement of the marls in the fracture zones of the rocks. Fluorescent features let to define hydrothermal and chemogenic minerals in the sedimentary rocks. For example, fluorescent borates in the salt formations of the evaporates. Nevertheless, complex methodical approach, such as XRD and XRF, needs for the accurate mineral definition.

**Keywords:** mineral fluorescence; multifocal petrography; epifluorescent microscopy; complex of the investigation methods; low-temperature hydrothermal processes.

## Введение

Петрография в настоящее время рассматривается как описательная наука, являющаяся составной частью петрологии, в которой изучается генезис горных пород и условия формирования месторождений полезных ископаемых. Традиционно петрографические исследования руд, пород и минералов проводятся методом изучения шлифов горных пород с помощью поляризационных петрографических микроскопов. На текущем этапе классическая описательная петрография преобразуется в цифровую петрографию в связи с развитием цифровых технологий. Современные цифровые микроскопы снабжены программными средствами, управляющими механизированными устройствами прибора, осуществляющими сбор и хранение данных и выполняющими анализ цифровых изображений изучаемых объектов.

Сегодня световая микроскопия наиболее широко применяется в медицине и биологии, поэтому такие микроскопы оснащены ультрафиолетовыми (УФ) источниками света для изучения флуоресценции исследуемых микрообъектов, однако в петрографии ультрафиолет по ряду причин не используется. Настоящая статья посвящена методам УФ макро- и микропетрографии, а также приложениям этих методов в научных исследованиях и практике геолого-разведочных работ.

## Объект и методика исследований

Изучение геологических объектов посредством УФ-петрографии основано на флуоресценции минералов. Известно, что среди существующих в природе более 4000 минералов только около 15 % являются флуоресцентными [1]. Большинство породообразующих минералов в литосфере излучают свет в рентгеновских лучах и под воздействием ускоренных потоков электронов (катодолюминесценция), а в ультрафиолете не флуоресцируют.

УФ-макропетрография предполагает освещение пород (керна скважин или штуфов) ультрафиолетом и съемку цифровым фотоаппаратом. Освещение выполнялось двумя лампами черного света F6T5/BLB с максимумом излучения 368 нм и шириной пика 20 нм. Такие лампы являются длинноволновыми источниками УФ-света (LWUV), однако их фильтр пропускает незначительную часть видимого излучения с длиной волны более 400 нм, в том числе слабый пик спектра ртути с длиной волны 404 нм. В результате можно видеть фиолетовое свечение источника, которое также фиксируется фотоаппаратом.

Флуоресценция пород и минералов широко используется в музейном деле и минералогическом коллекционировании, так как необычное УФ-свечение вызывает интерес, выявляя невидимые в дневном свете оптические свойства минералов [2]. Этот подход выступает методом макропетрографии, кроме того, он применяется в геологоразведке для поиска рудных флуоресцентных минералов – шеелита, минералов урана, циркона, а также в технологиях обогащения флуоресцирующих компонентов пород, таких как флуориты, алмазы и др. Флуоресцентные минералы характерны для гидротермальных пород, жил, метасоматитов, зон окисления рудных месторождений, являясь, таким образом, поисковым признаком, как, например, апатит с фиолетово-синей флуоресценцией алмазоносных кимберлитовых трубок.

Обычно флуоресценцию минералов вызывают не их макроэлементы, а примеси (активаторы). Наиболее известные активаторы – марганец, железо, хром, титан, медь, свинец, европий, церий, уран, вольфрам, молибден, сера, азот и различные органические вещества. Только несколько «чистых» минералов флуоресцируют самостоятельно, такие как шеелит, повелит, минералы урана и некоторые другие. В результате использовать флуоресценцию для идентификации минералов из разных месторождений не представляется возможным, так как активаторы в этом случае неодинаковы. Однако в пределах одного месторождения флуоресценция является надежным типоморфным признаком. Так, в осадочных породах терригенные минералы с идентичными флуоресцентными свойствами поступали из единого источника сноса.

Макропетрографические УФ-исследования в настоящее время не получили широкого распространения, и стандартные петрографические микроскопы УФ источником света не комплектуются. Результаты данной работы получены с помощью цифрового микроскопа Nikon Eclipse 80i (Япония) с УФ ртутным источником света C-HGFI. Основным объектом исследования являлся керн осадочных пород Старобинского месторождения калийных солей (Беларусь) и месторождения Бамнет Наронг формации Маха Саракхам (Таиланд).

### Макропетрографические УФ-исследования горных пород

В результате выполненных макропетрографических УФ-исследований определено, что флуоресцирующими компонентами нормально-осадочных пород являются минералы хемогенно-осадочных пород и гидротермальных жильных образований. На рис. 1 представлены цифровые УФ-фотографии низкотемпературных гидротермальных образований, выполняющих тектонические трещины в осадочных породах. Можно видеть, что вмещающие осадочные породы не флуоресцируют, но имеют насыщенный фиолетовый цвет ( $H = 270 \pm 3^\circ$ ,  $S = 75 \pm 2\%$ ,  $B = 45 \pm 15\%$  в HSB цветовом пространстве). Это объясняется отражением света УФ-лампы от поверхности исследуемых пород. Цифровые фотоаппараты частично воспринимают фиолетовое излучение в спектральной области длин волн 400 нм и фиксируют отраженный ультрафиолет.

На рис. 1 представлены разные низкотемпературные гидротермальные образования: на рис. 1, а, показана цифровая УФ-фотография тектонической трещины, выполненной гипсом  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , на рис. 1, б, – целестином  $\text{SrSO}_4$ . Гипс в образце Дар. 1к-042 в длинноволновом ультрафиолете имеет желтый оттенок ( $H = 49^\circ$ ,  $S = 28\%$ ,  $B = 100\%$ ), а целестин в образце Дар. 1к-003 – зеленый ( $H = 127^\circ$ ,  $S = 17\%$ ,  $B = 82\%$ ). Обзор спектров люминесценции этих минералов показывает большое разнообразие цветов [3]. К сожалению, сведения о количественных параметрах цветности УФ-флуоресценции большинства минералов к настоящему времени отсутствуют, однако существует ряд работ, посвященных спектрам люминесценции минералов [4; 5]. В данной статье спектры люминесценции не изучались, а для анализа флуоресценции использовались количественные параметры цветности.

УФ-макропетрография позволяет выявить не только жильные гидротермальные процессы, но и некоторые хемогенно-осадочные. Хемогенно-осадочные образования (эвапориты) возникают в результате кристаллизации минералов из растворов соленой морской или озерной воды при ее испарении. Хемогенными минералами являются карбонаты, сульфаты, хлориды, нитраты, бораты, которые входят в состав осадочной породы вместе с терригенными компонентами или слагают породу полностью.

На рис. 2, а, представлена УФ-фотография керна образца Дар. 1к-017, где можно видеть три генерации флуоресцентных минералов.

Приложения УФ-макропетрографии разнообразны. На рис. 2, б, представлена УФ-фотография керна образца 2е-352 с пластичным гипсом в составе сульфатно-карбонатно-глинистых пород скважины 2е месторождения калийных солей Бамнет Наронг формации Маха Саракхам. Большой выход флуоресценции свидетельствует о значительном влиянии гидротермальных процессов формирования этих пород, при этом повышенная пластичность гипса является негативным фактором устойчивости вмещающих горных пород данного калийного месторождения.

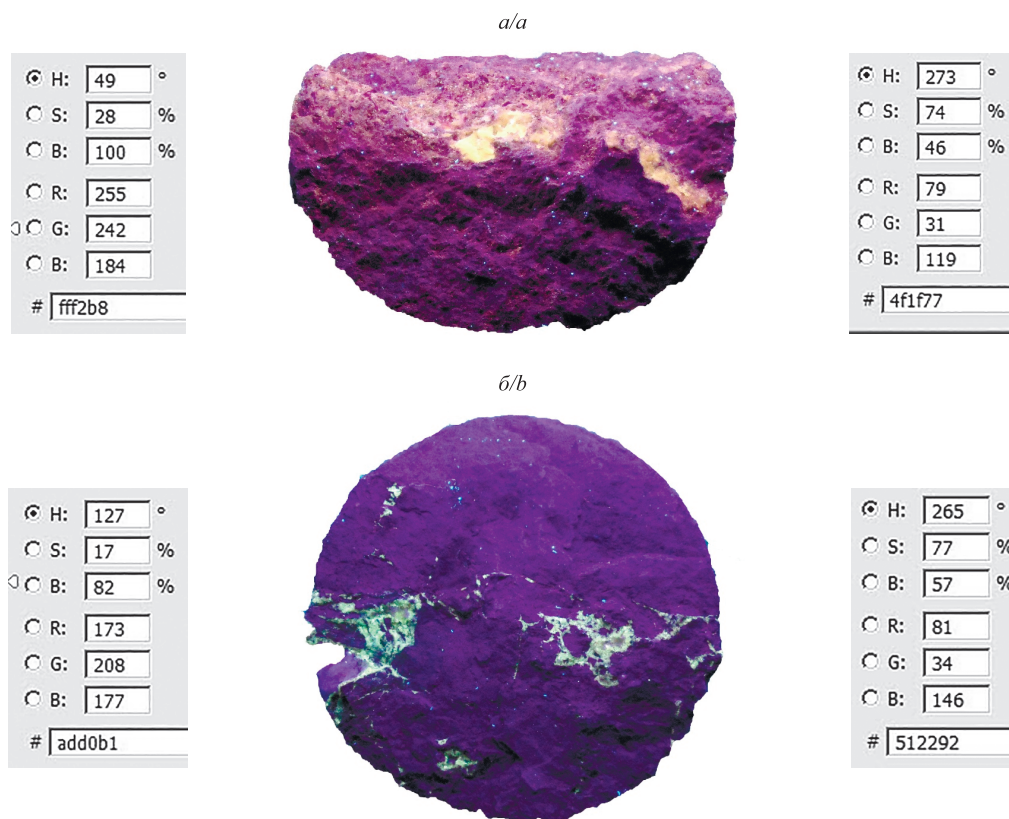


Рис. 1. Цифровые УФ-фотографии образца Дар. 1к-042 (глубина 693,98 м; песчаник 8-й пачки) (а) и образца Дар. 1к-003 (глубина 206,70 м; целестин в тектонической трещине мергеля) (б). Диаметр керна 105 мм. Слева – параметры цветности низкотемпературных гидротермальных минералов, выполняющих тектонические трещины, справа – параметры основной массы породы

Fig. 1. Digital UV photos of sample Dar. 1k-042 (depth 693.98 m; this is a sandstone of the 8<sup>th</sup> geologic unit) (a) and sample Dar. 1k-003 (depth 206.70 m; there is celestine in the crumbling marl) (b). Core diameter is 105 mm.

The color parameters of the low-temperature hydrothermal minerals that filling tectonic cracks are on the left side and the rock's parameters are on the right side of the figure

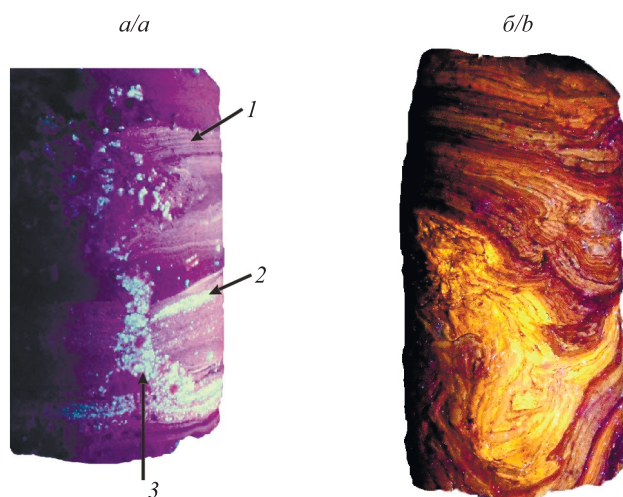


Рис. 2. УФ-фотография керна образца Дар. 1к-017 (а):

1 – флуоресценция хемогенно-осадочного кальцита в составе мергеля; 2 – низкотемпературный гидротермальный гипс в водопроницаемых слоях; 3 – низкотемпературный гидротермальный гипс по тектоническим трещинам. УФ-фотография керна образца 2е-352 (пластичный слой гипса в составе сульфатно-карбонатно-глинистой породы) (б). Диаметр керна 100 мм

Fig. 2. Digital UV photo of the core sample Dar. 1k-017 (a):

1 – fluorescence of chemogenic calcite as a part of the marl; 2 – a low-temperature hydrothermal gypsum in the permeable layers; 3 – a low-temperature hydrothermal gypsum that filling tectonic cracks. Digital UV photo of the core sample 2e-352 (this is the plastic gypsum layer in the sulfate-carbonate-clayey rock) (b). Core diameter is 100 mm



### Развитие методов УФ-микроструктурной петрографии

Современные петрографические микроскопы не ориентированы на УФ-исследования горных пород и не снабжены источником УФ-света. Петрографические исследования традиционно выполняются в видимой части электромагнитного спектра (380–750 нм) с использованием шлифов в режиме «на просвет», при этом изучаются кристаллооптические свойства минералов: явления поглощения света, показатели преломления, цвета интерференции и др. Эти параметры позволяют идентифицировать большинство породообразующих минералов, выполнить определение пород и изучить их структурно-текстурные характеристики.

УФ-исследования шлифов не эффективны, так как при стандартной толщине шлифа 0,03 мм минералы прозрачны и слабо поглощают УФ-излучение, из-за чего эффект возбуждения люминофора мал, а выход флуоресценции незначителен. Эффективность этого метода возрастает при работе в режиме «на отражение», когда падающее на поверхность породы УФ-излучение полностью поглощается массивным образцом. Таким образом, УФ-микроструктурная петрография предполагает микроскопическое исследование поверхности пород и минералов.

Этому методическому подходу препятствует хорошо известная проблема – недостаток глубины резкости микроскопа. Собственная глубина резкости объектива микроскопа способна обеспечить резкость изображения только в ограниченном диапазоне высоты, а оставшиеся части изображения размываются. Современные цифровые микроскопы снабжены моторизованным столиком, управляемым программным обеспечением, которое позволяет получить серию микрофотографий в диапазоне глубин, охватывающих изучаемый рельеф образца. В дальнейшем набор микрофотографий совмещается в единое резкое изображение с помощью современных программных средств. Этот методический подход называют Z-стекингом (*Z-stacking*), или мультифокальной микроскопией. На рис. 3, а, представлена микрофотография Z-стека песчаной фракции золотоносной россыпи в режиме «на просвет», на рис. 3, б, – в режиме «на отражение».

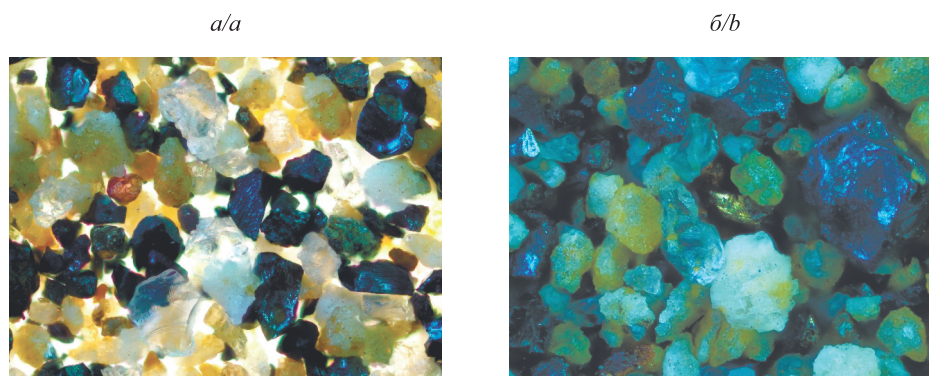


Рис. 3. Микрофотографии Z-стеков песчаной фракции россыпных месторождений в режиме «на просвет» (а) и в режиме «на отражение» (б).

Можно видеть зерно золота в составе песчаной фракции россыпного месторождения. Размер поля зрения 1,25 мм

Fig. 3. The transmitted light (a) and the reflected light (b) Z-stack of the alluvial sand. The gold grain in the sand fraction of placer deposits is visible. The size of the field of view is 1.25 mm

Микроскопические исследования поверхности горных пород методом Z-стекинга пока не получили широкого распространения, несмотря на его эффективность. При этом вид минералов на поверхностях горных пород существенно отличается от их вида в шлифах. В дневном отраженном свете они выглядят так же, как минеральные зерна крупнозернистых пород, наблюдаемые невооруженным глазом. Микроструктурная петрография поверхностей пород в режиме «на отражение» имеет свои недостатки и преимущества. Действительно, классические методы исследования шлифов в проходящем свете дают возможность изучить большое количество кристаллооптических параметров минералов, недоступных для исследований в отраженном свете. С другой стороны, изготовление шлифов горных пород – трудоемкий процесс, выполняемый в специализированных мастерских, а исследование поверхностей пород не требует такой подготовки.

Рассматриваемый здесь методический подход представляет собой комбинацию УФ-микроскопии с мультифокальным Z-стекингом поверхностей горных пород в режиме «на отражение». Современные цифровые УФ-микроскопы снабжены системой флуоресцентных светофильтров (рис. 4, а). Фильтр возбуждения пропускает лишь ультрафиолет, который возбуждает флуоресценцию минералов-люминофоров, а фильтр эмиссии – спектральный диапазон видимого света, предотвращая дальнейшее прохождение воз-

буждающего ультрафиолета. В оптической системе цифрового микроскопа используются только флуоресцентные объективы, а вся остальная оптика (окуляр, объектив фотоаппарата) исключена. Такой методический подход широко применяется в медицине и биологии и называется эпифлуоресцентной микроскопией. На рис. 4, б, представлена микрофотография Z-стека эпифлуоресцентной микроскопии поверхности мелкозернистого песчаника. Здесь зерно циркона  $ZrSiO_4$  выделяется большим квантовым выходом желто-оранжевой флуоресценции ( $H = 44^\circ$ ,  $S = 87\%$ ,  $B = 97\%$ ).

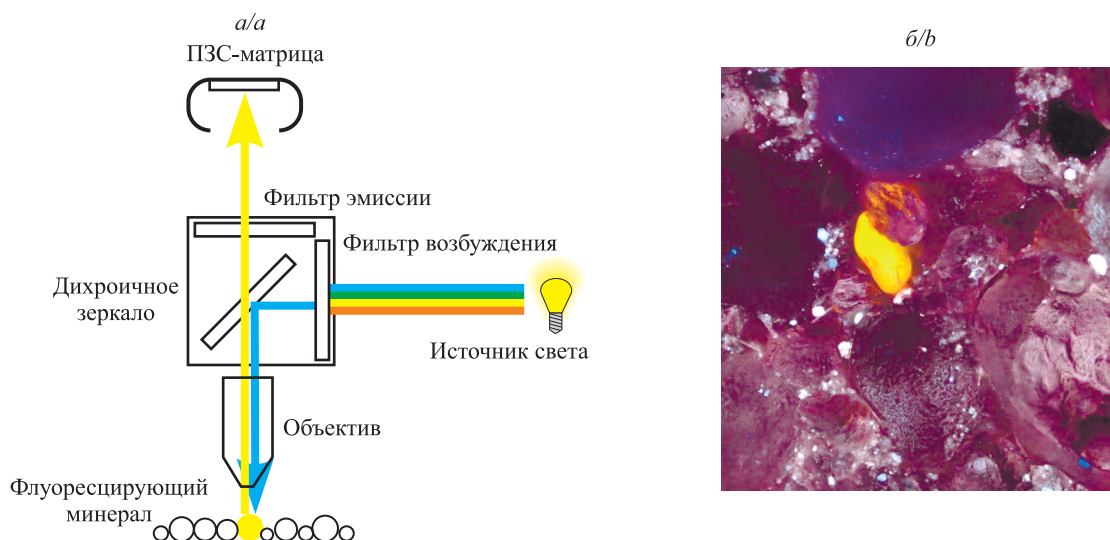


Рис. 4. Оптическая схема эпифлуоресцентного цифрового микроскопа (а) и УФ-микрофотография зерна циркона в составе песчаника (б). Размер поля зрения 0,62 мм

Fig. 4. Optical configuration of an epifluorescence digital microscope (a) and UV microphoto of a zircon grain in sandstone (b). The size of the field of view is 0.62 mm

Использование УФ источника света имеет ряд преимуществ. Разрешение оптического микроскопа  $R$  в режиме «на просвет», как известно, определяется формулой

$$R = \frac{1,25\lambda}{2A},$$

где  $\lambda$  – длина волны света, нм;  $A$  – числовая апертура объектива микроскопа.

Из-за того что длина волны ультрафиолета меньше длины волны белого света, разрешение микроскопа возрастает. В среднем разрешение оптических микроскопов при использовании белого света составляет около 2,5 мкм, а в эпифлуоресцентной микроскопии – 1,9 мкм.

Другим преимуществом флуоресценции является то обстоятельство, что в микроскопе наблюдают не отраженный или поглощенный свет от источника освещения, а свечение, вызываемое излучением хромофоров в составе минералов, т. е. минералы флуоресцируют и сами выступают источниками света. Это устраняет aberrации конденсора, и разрешение изображений существенно повышается. Увеличение разрешающей способности микроскопа особенно важно при исследовании дисперсных осадочных пород. Действительно, в шлифах осадочных пород при исследовании их «на просвет» прозрачные дисперсные минералы перекрывают друг друга, что также ухудшает условия наблюдения. Исследование поверхности пород «на отражение» исключает перекрытие изображений зерен внутри породы.

### Результаты петрографических УФ-исследований

На рис. 5 представлены УФ-фотографии макро- и микропетрографии образца Дар. 1к-024 Дарасинского участка надсолевой верхнедевонской толщи Старобинского месторождения калийных солей [6]. Этот образец является мергелем брекчированным, кавернозным. В составе породы выделяются известковые обломки и вторичная кальцитовая минерализация, приуроченная к системе тектонических трещин. Каверны возникли на месте выщелачивания кристаллов солей.

УФ-исследования выявляют полигенные процессы формирования породы. Терригенный материал алевроитовой размерности характеризуется разными источниками его поступления в бассейн седиментации. Большинство частиц имеют малый выход флуоресценции, что свойственно кварцу и алюмосиликатам – преобладающим минералам терригенной составляющей осадочных пород. Однако здесь выделяются

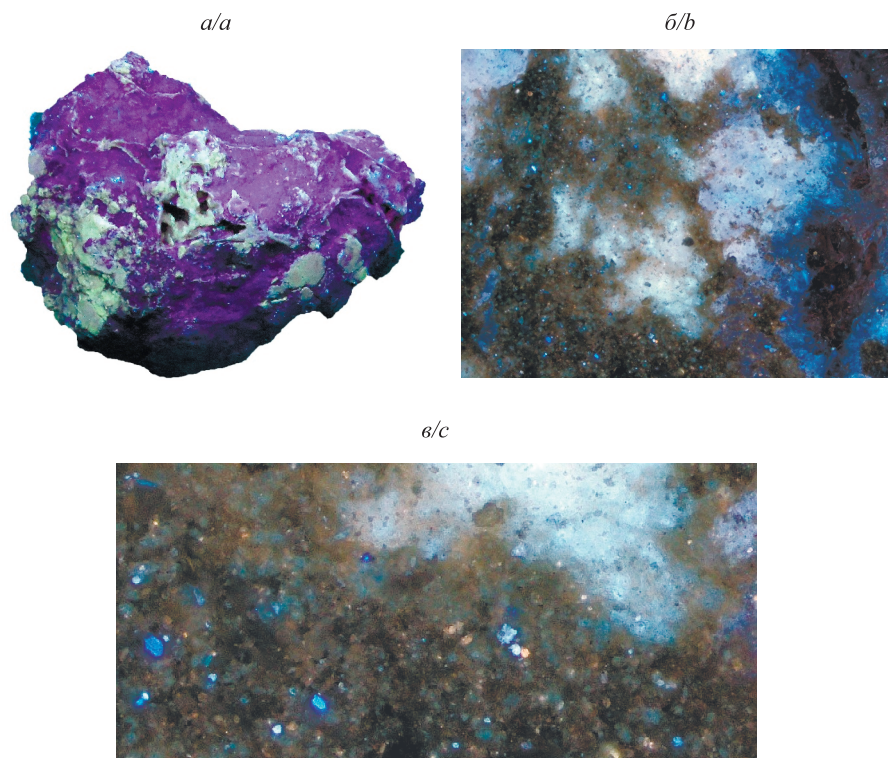


Рис. 5. Образец Дар. 1к-024: а – цифровая УФ-фотография (размер образца 8 см);  
б – Z-стек УФ-микрофотографии (размер поля зрения 3,12 мм);  
в – Z-стек УФ-микрофотографии (размер поля зрения 1,29 мм)

Fig. 5. There is a sample Dar. 1k-024: а – digital UV photo (sample' size is 8 cm);  
б – Z-stack of UV microphoto (the size of the field of view is 3.12 mm);  
в – Z-stack of UV microphoto (the size of the field of view is 1.29 mm)

синие ( $H = 202\text{--}212^\circ$ ,  $S = 63\text{--}96\%$ ,  $B = 26\text{--}86\%$ ) и оранжевые ( $H = 25\text{--}28^\circ$ ,  $S = 41\text{--}43\%$ ,  $B = 87\text{--}96\%$ ) минералы с большим выходом флуоресценции. Типоморфное значение флуоресценции показывает, что эти минералы поступили в бассейн седиментации из разных гидротермальных источников.

Основная масса мергеля, состоящая из дисперсного кальцита и глинистых минералов, в основном иллита, в ультрафиолете выявляет структуру, невидимую для других методов исследования осадочных пород, – колломорфное агрегатное строение. Минеральные зерна кальцита в составе мергеля имеют размер 250–350 нм и выделяются оранжевым цветом с малым выходом флуоресценции ( $H = 37\text{--}42^\circ$ ,  $S = 22\text{--}29\%$ ,  $B = 29\text{--}35\%$ ). По-видимому, часть флуоресценции гасится содержащимися в мергеле глинистыми минералами. Размер их микрочастиц не превышает 0,001 мм и соответствует пределу разрешения оптического микроскопа, поэтому микрокристаллы глинистых минералов не видны при микропетрографических исследованиях.

Кроме карбонатных пород, в составе брекчии выделяются зоны низкотемпературного метасоматического замещения агрегатов мергеля, прилегающих к системе трещиноватости породы. Можно видеть, что метасоматоз проявляется в некоторых агрегатах мергеля в большей степени, чем в других. При этом даже в глубоко преобразованных участках сохраняются зерна химически устойчивых терригенных минералов.

### Использование УФ-петрографии в комплексе физико-химических методов исследования руд, пород и минералов

Флуоресцентные свойства гидротермальных и хемогенных осадочных минералов позволяют эффективно обнаруживать эти минералы в составе нормально-осадочных образований. Например, бораты, как правило, характеризуются высоким квантовым выходом флуоресценции. На рис. 6 представлена цифровая УФ-фотография образца зерна каменной соли с хилгардитом ( $\text{Ca}_2\text{B}_5\text{O}_9\text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) из пород мелового возраста эвапоритовой формации Маха Саракхам.

Хилгардит является кальциевым пентаборатом, он распространен в солянокупольных структурах многих эвапоритовых формаций. Хилгардит – дисперсный минерал, нерастворимый в воде. На рис. 6, б, приведена дифрактограмма нерастворимого остатка изучаемого образца.



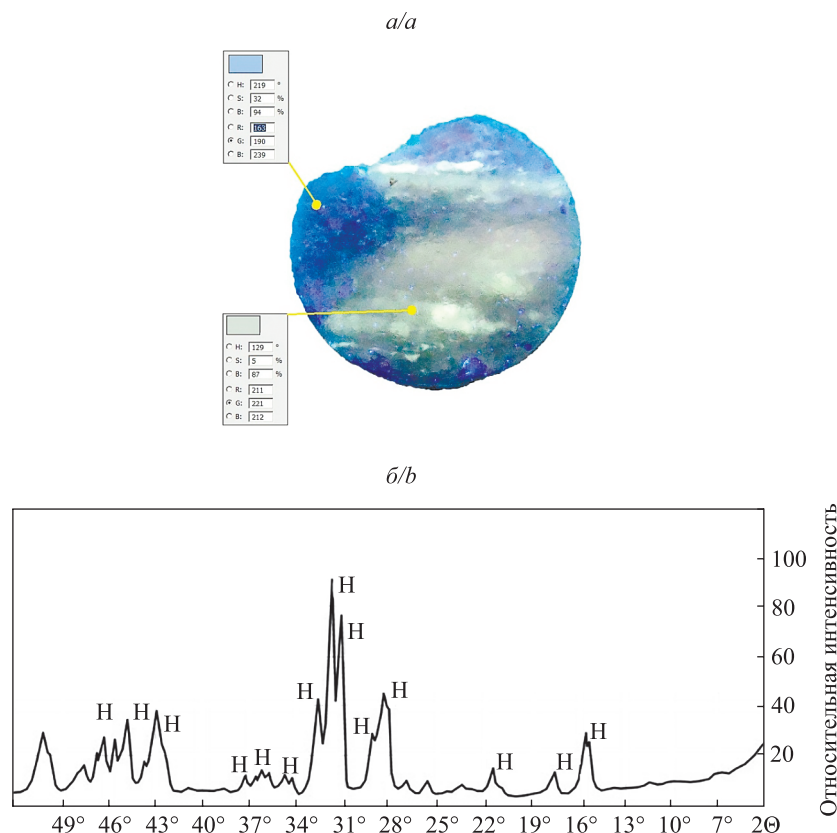


Рис. 6. Цифровая УФ-фотография образца 2е-85  
(диаметр керн 85 мм) (а) и дифрактограмма хилгардита (б)

Fig. 6. Digital UV photo of sample 2e-85  
(core diameter is 85 mm) (a) and hilgardite XRD pattern (b)

УФ-петрографии недостаточно для идентификации флуоресцентных минералов, для этого используют рентгенодифрактометрический анализ, методы определения химического состава минералов и другие современные физико-химические методы. Однако УФ-петрография позволила выявить распределение хилгардита в породе не только на поверхности скола керн, но и внутри образца, поскольку галит является прозрачным как в видимой части спектра, так и в ультрафиолете. Характер распределения хилгардита в породе подтверждает одно из предположений его генезиса – ранний низкотемпературный гидротермальный процесс под действием растворов, обогащенных кальцием [7]. Активность низкотемпературных гидротермальных растворов формации Маха Саракхам подтверждается также данными УФ-макропетрографии (см. рис. 2, б), где заметны эффекты повышенного квантового выхода флуоресценции пород.

### Заключение

УФ-микроскопия является инновационным методическим подходом исследования пород и минералов. Она не используется пока в полной мере ввиду ряда причин: малого выхода флуоресценции минералов в шлифах горных пород, отсутствия УФ источников освещения и фильтров эпифлуоресцентной микроскопии, а также из-за необходимости вести исследования в режиме «на отражение» методами Z-стекинга. Добавочным негативным фактором выступает то обстоятельство, что большинство породообразующих минералов не флуоресцируют в ультрафиолете.

Последняя проблема может быть решена при использовании сразу двух источников освещения. Опыт показывает, что оптимальное качество микрофотографий Z-стеков поверхностей горных пород достигается при умеренном освещении дневным светом и одновременной УФ-подсветке с применением эпифлуоресцентных фильтров. Яркость освещения образца ультрафиолетом можно регулировать как блоком питания осветителя, так и нейтральными УФ-фильтрами микроскопа. Такой методический подход позволяет наблюдать нефлуоресцентные и флуоресцентные минералы в одном поле зрения, при этом чувствительность метода очень высока, так как он способен обнаруживать даже единичные микрозерна флуоресцентных минералов.



### Библиографические ссылки

1. Горобец БС, Рогожин АА. *Спектры люминесценции минералов*. Москва: ВИМС; 2001. 312 с. (Минеральное сырье; выпуск 11).
2. Warren TS, Gleason S, Bostwick RC, Verbeek ER. *Ultraviolet light and fluorescent minerals*. Rio: T. S. Warren; 1995. 209 p. (Understanding, collecting and displaying fluorescent minerals).
3. Henkel G. The Henkel glossary of fluorescent minerals. *Journal of the Fluorescent Mineral Society*. 1988;15(1988–1989):1–91.
4. Тарашчан АН. *Люминесценция минералов*. Киев: Наукова думка; 1978. 296 с.
5. Марфунин АС. *Спектроскопия, люминесценция и радиационные центры в минералах*. Москва: Недра; 1975. 327 с.
6. Петрова НС, Денисова НЮ, Кирикович АВ. Микроструктурная характеристика калийных руд Припятского калиевого бассейна. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2019;1:82–94.
7. El Tabakh M, Utha-Aroon C, Schreiber BC. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand. *Sedimentary Geology*. 1999;123(1–2):31–62. DOI: 10.1016/S0037-0738(98)00083-9.

### References

1. Gorobets BS, Rogozhin AA. *Spektry lyuminestsentsii mineralov* [Luminescence spectra of minerals]. Moscow: VIMS; 2001. 312 p. (Mineral raw materials; issue 11). Russian.
2. Warren TS, Gleason S, Bostwick RC, Verbeek ER. *Ultraviolet light and fluorescent minerals*. Rio: T. S. Warren; 1995. 209 p. (Understanding, collecting and displaying fluorescent minerals).
3. Henkel G. The Henkel glossary of fluorescent minerals. *Journal of the Fluorescent Mineral Society*. 1988;15(1988–1989):1–91.
4. Tarashchan AN. *Lyuminestsentsiya mineralov* [Luminescence of minerals]. Kyiv: Naukova dumka; 1978. 296 p. Russian.
5. Marfunin AS. *Spektroskopiya, lyuminestsentsiya i radiatsionnye tsentry v mineralakh* [Spectroscopy, luminescence and radiation centers in minerals]. Moscow: Nedra; 1975. 327 p. Russian.
6. Petrova NS, Denisova NYu, Kyrkovich AV. Microfabric characteristics of potash ore of the Pripyat potash-bearing basin. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2019;1:82–94. Russian.
7. El Tabakh M, Utha-Aroon C, Schreiber BC. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand. *Sedimentary Geology*. 1999;123(1–2):31–62. DOI: 10.1016/S0037-0738(98)00083-9.

Статья поступила в редколлегию 30.12.2019.  
Received by editorial board 30.12.2019.