

Программные системы и вычислительные методы

Правильная ссылка на статью:

Градов О.В., Александров П.Л., Градова М.А. — Исследование образцов релевантных для пустынных местонахождений минералов методами программного корреляционно-спектрального анализа регистрограмм сканирующей электронной микроскопии: от 2D-Фурье-спектров до он-лайн-анализа статистики интегральных пространственных характеристик // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – № 4. DOI: 10.7256/2454-0714.2019.4.31379 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=31379

Исследование образцов релевантных для пустынных местонахождений минералов методами программного корреляционно-спектрального анализа регистрограмм сканирующей электронной микроскопии: от 2D-Фурье-спектров до он-лайн-анализа статистики интегральных пространственных характеристик

Градов Олег Валерьевич

старший научный сотрудник, ИНЭПХФ РАН

119334, Россия, г. Москва, ул. Ленинский Пр., 38, кор. 2, каб. 18

✉ neurobiophys@gmail.com



Александров Павел Леонидович

ИНЭПХФ РАН

119334, Россия, г. Москва, ул. Ленинский Проспект, 38, к. 2

✉ neurobiophys@gmail.com



Градова Маргарита Алексеевна

кандидат химических наук

старший научный сотрудник, ФИЦ ХФ РАН

1, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 119991, 4, оф. 146

✉ gradova@chph.ras.ru



[Статья из рубрики "Компьютерная графика, обработка изображений и распознавание образов"](#)

Аннотация.

Целью настоящей статьи является демонстрация возможности идентификации минералов, характерных для пустынных регионов, в экспедиционных условиях и в малых лабораториях, не обладающих средствами для обеспечения энергодисперсионного микроанализа (EDXMA) либо картирующих методов волнодисперсионной спектроскопии (WDXRS), за счёт использования в качестве техники идентификации отдельных точек и зон интереса (ROI) на образце программных средств корреляционно-спектрального анализа изображения (QAVIS). Доказывается, что данная техника позволяет идентифицировать отдельные, ценнейшие в ресурсном отношении минералы, используя интегральную частотную и интегральную пространственную характеристику, а также собственно Фурье-спектр и коррелограмму между образцами. Регистрация

производилась на системе JEOL JSM, оцифрованной П.Л. Александровым (ИБХ РАН) Измерения производились с использованием программного обеспечения QAVIS, разработанного в ДВО РАН коллективом Лаборатории анализа океанологической информации (разработчики – Гончарова А.А., Фищенко В.К.) Отдела информационных технологий Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева ДВО РАН. Оперативность обработки видеоданных обеспечивается использованием одной из наиболее «быстрых» библиотек дискретного преобразования Фурье - FFTW и тщательной оптимизацией программного кода QAVIS авторами данной программы (программа работает с видеопамятью компьютера, что позволяет обрабатывать все кадры видеопотока одновременно с его просмотром на экране компьютера). Таким образом, показано, что программный корреляционно-спектральный анализ может служить в работе с пустынными и релевантными им минералами не только для аддитивного анализа минералов в случае использования методов сканирующей микроскопии, но и для отличия субмикроструктур данных образований и получения гистограмм статистических распределений их дескрипторов.

Ключевые слова: режим реального времени, Си, Фортран, дискретное преобразование Фурье, корреляционно-спектральный анализ, двумерный Фурье-спектр, анализ изображений, библиотека FFTW, анализ морфологии минералов, шероховатость поверхности

DOI:

10.7256/2454-0714.2019.4.31379

Дата направления в редакцию:

27-12-2019

Дата рецензирования:

17-11-2019

Целью настоящей статьи является демонстрация возможности идентификации минералов, характерных для пустынных регионов, в экспедиционных условиях и в малых лабораториях, не обладающих средствами для обеспечения энергодисперсионного микроанализа (EDXMA) либо картирующих методов волнодисперсионной спектроскопии (WDXRS), за счёт использования в качестве техники идентификации отдельных точек и зон интереса (ROI) на образце программных средств корреляционно-спектрального анализа изображения (QAVIS). Доказывается, что данная техника позволяет идентифицировать отдельные, ценнейшие в ресурсном отношении минералы, используя интегральную частотную и интегральную пространственную характеристику, а также собственно Фурье-спектр и коррелограмму между образцами.

Введение

С древнейших времён пустынные месторождения минералов являлись предметом интереса и добычи: уже ко времени экспедиции Санха в Восточной пустыни (период Среднего царства) в иерархии правителей нома значились начальники пустынь (в

частности – начальники восточных пустынь, примером которых может быть Хнумхотеп II), а уже к началу XII династии правители, пользуясь сложившейся субординацией, участвовали в организации экспедиций за минералами, в особенности за галенитом, вглубь пустыни, в Гебель-эль-Зейт [10]. В эпоху верхнеегипетской культуры Бадари (конец VI тыс. - 4000 г. до н.э.) минералы, находимые в пустыне, использовали не только в качестве прижизненных украшений, но также и в качестве атрибутов погребального культа – по данным монографии «The Archaeology of early Egypt: social transformations in North-East Africa, 10000 to 2650 BC» (Cambridge University Press), «в могилу закладывались кусочки малахита, добываемого в Восточной пустыне, реже – галенита, а также следы их растирания на палетках» [1]. Некоторые минеральные образования пустыни, а также продукты выветривания, находившиеся в ней на открытых пространствах, без использования инструментальных средств, получили топонимически-детерминируемые названия, апеллирующие к некоторым пустынным регионам, а барит и гипс в форме сросшихся под различными углами кристаллов, находимых в Сахаре, получил интегральное топонимическое наименование «роза пустыни» [6]. Визуальный метод идентификации минеральных форм на протяжении тысячелетий определял ограничения в дифференциации подобных форм, а собственно форма, в сущности, и подразумевалась, наряду с иными признаками габитуса (цветом, ориентом) как сам минеральный вид; что, как стало ясно в ходе развития инструментальных методов минералогии, не соответствует действительности. На данный момент инструментальные методы достигли известного совершенства, однако полевые / экспедиционные условия, а также условия применения мобильных лабораторий, допускают их использование лишь с существенными ограничениями, что связано и с габаритами обрудования, и с невозможностью его использования в аридных зонах без специализированного охлаждения.

Наиболее информативным методом исследования и идентификации пустынных минералов является спектроскопия вторично-эмиссионного рентгеновского излучения с картированием под электронным пучком химического состава образцов. На сканирующие электронные микроскопы ставятся приставки волнодисперсионной (WDXS, WDS, WDXRS) и энергодисперсионной (EDS, EDX, EDXS, XEDS, EDXA, EDXMA) спектрометрии. В качестве примера минералов пустыни, с их помощью исследованных в последнее время, можно привести: вышеупомянутый галенит, что встречается также в виде акцессорной минерализации в мусковитовых гранитах [4]; собственно, мусковитовый гранит, содержащий также акцессорные примеси циркона и граната с достаточно развитой (радио-)изотопией [4]; некоторые другие радиоизотопно-обогащённые минералы [33]. В результате подобных измерений получают рентгеновские спектральные фингерпринты или спектральные сигнатуры – аналоги спектральных сигнатур пустынных минералов, снимавшихся в видимом и инфракрасном диапазоне, начиная с 1970-х гг. [23]. Собственно контраст на картах по данным сигнатурам (например, инфракрасным [35]) и является дескриптором идентификации пустынных минеральных образований при высотной съёмке. Морфология объекта в сигнатурах представляется как распределение его спектральных свойств, их градиент, а не как лишь форма. Аналогично, если некоторый диапазон длин волн для данного объекта допускает измерение или оценку рассеяния (например, в коротковолновом диапазоне для дисперсных минералов пустынь, находящихся в форме минеральной пыли / аэрозоля [32]), то его дескриптором-фингерпринтом будет являться спектр рассеяния, а не спектр поглощения (как это свойственно для того же типа образцов в длинноволновом диапазоне [28] или для образца в конденсированной фазе). Карта же оптической плотности или карта

рентгеновской эмиссии под электронным пучком, очевидно, не даёт сама по себе, будучи оторванной от численных данных, дескрипторов фазовой структуры / текстуры минерального образца, поэтому, допуская возможность расшифровки химизма фаз, не обеспечивает возможности интерпретации регулярности и скоррелированной взаимоориентации фаз, свидетельствующей о процессах минералогенеза и условиях их протекания. В связи с этим, в настоящее время требуется возрождение на новом аппаратном уровне аналога устаревшего по инструментальной части, но не исчерпавшего себя по принципиальной идеологии, метода 1930-х гг. – геометро-химического анализа [17].

Материалы и методы

Нами были предприняты попытки апробации нового подхода. Измерения производились в режиме реального времени непосредственно с экрана, что позволяло модифицировать протокол измерений в соответствии с потребностями, диктуемыми структурой образца. В других случаях, как правило, использовались преимущества пост-обработки экспериментального материала. Как показала практика, многоугловое позиционирование образцов не всегда является необходимым, так как ровная структура некоторых образцов допускает применение последующего вращения в угловых координатах самого изображения / целевого ROI. Измерения производились на системе JEOL JSM, оцифрованной П.Л. Александровым (ИБХ РАН). Картирование состава образцов при этом не производили, производя эксперимент, максимально приближенный к возможностям тех компактных мобильных лабораторий, снабженных настольными электронными микроскопами, которые способны к беспрепятственной работе в условиях пустынь. Измерения производились с использованием программного обеспечения QAVIS, разработанного в ДВО РАН коллективом Лаборатории анализа океанологической информации (разработчики – Гончарова А.А., Фищенко В.К.) Отдела информационных технологий Тихоокеанского океанологического института им. В.И.Ильичева ДВО РАН.

Выбор материалов (образцов)

В качестве минералов были избраны образцы, близкие по фазе и составу к пустынным или родственным им по нахождению формам (однако отличные по источнику местонахождения). К сожалению, получить достаточно репрезентативную выборку минералов пустыни для работы на установке с использованием электронного пучка нам не удалось, в силу опасений специалистов относительно возможности повреждения коллекции, однако для апробации метода применение нами близких аналогов является достаточным (хотя, если бы статья имела геоминералогический акцент, она бы, естественно, не вышла и не была подана в печать без соответствующих данных). Для программного же средства принципиально безразлично используются ли минерал пустыни или Кольского полуострова, если речь не идёт о машинном обучении и наработке базы данных с целью автоматизированной идентификации образцов. Ниже перечисляются примеры образцов, которые использовались в прикладных тестах первого уровня.

· Во-первых, анализировались образцы галенита [4], о наличии которого в качестве релевантного пустынного минерала говорилось выше. Как дополнительный пример, можно указать, что в породах Восточной Пустыни (особо – в интрузивных породах Эль-Села), галенит репрезентативно представлен в двухслойных гранитах, хотя и не представлен в дайках (микрогранитных, долеритовых и бостонитовых) [11]. Среди карбонатных пород, сформированных из посттектонических (низкотемпературных)

гидротермальных растворов в разломах, Au-минерализация кварцкарбонатных жил Хамама и слабо минерализованных доломитовых жил, заполняющих мезотрещины в базальтах Восточной Пустыни Египта, галенит представлен наряду с киноварью и баритом [12]. В свите Au-Ag там же (Хаймур – Юго-Восточная Пустыня Египта) Au-минерализации также сопутствует зоны галенита окислительного генеза.

· Во-вторых, анализировались образцы магнетита. Его релевантность как пустынного минерала обусловлена множеством прецедентов. Помимо очевидного с прикладных позиций аргумента о встречаемости магнетита как минерала-спутника и индикатора алмазоносных пород [16] (в работе по обнаружению микроалмазов и их минералов-спутников в каньоне Махтеш Рамон в пустыне Негев [16] указывается, что, помимо шпатов, пироксенов, для данных условий также характерен магнетит), рационально указать на сопутствование магнетита золотым месторождениям [12] (например – в породах Восточной Пустыни, особенно, в интрузивных породах Эль-Села, магнетит встречается в долеритовых дайках и в подвижных химических формах некоторых интрузивных пород [5, 12]). Наличие магнетита как в грубой, так и в дисперсной, аэрозольной форме, усложняет процесс сопоставления его фингерпринтов образцам различной гранулярности. В классической работе, вышедшей 40-лет назад [3], по золотым пескам Долины озёр в пустыне Гоби (входящей, как известно, в Азиатский пустынный пояс), указывается, в частности, что тяжелая фракция включает: зерна эпидота, роговой обманки и магнетита. Анализируя химизм минеральных структур в пустынях Прикаспия, авторы сообщения [2] говорят о наличии группы минералов в песках, дифференцирующейся по минеральному или фазово-дисперсному составу (в результате механического действия климата, преимущественно анемологической направленности в случае пустынь), среди которых особо указывают на содержащие железо ильменит и магнетит [2]. Это соответствует классическим представлениям Сидоренко об золотой дифференциации вещества в пустыне [14]. В египетских же пустынях встречается (также как рассеянный компонент хостинг-минерализации) с пегматитом в ассоциации с гранитами [24]. В Восточной пустыне на территории ЮАР были обнаружены магнетит-ильменит-апатитовые руды (нельсонит – окисно-солевая жильная порода из титано-железо-фосфатной подгруппы) [22]. В пустыне же обнаружены прецеденты магнетитовой микробиологической биоминерализации (у магнетотактических бактерий) [19]. Чистая абиогенная минерализация магнетитом была открыта в рудных отложениях Ум Хейг в Восточной пустыне Египта [18]. При дистанционном зондировании Марса оказалось возможным идентифицировать ряд пустынных геологических структур (т.н. пустынный загар), содержащих магнетит в существенном для анализа количестве [29]. Таким образом, репрезентативность и релевантность магнетита как пустынного минерала может быть доказана не только для абиогенных, но и для биогенных, а также не только для земных, но и для иных планетохимических условий.

· В-третьих, анализировались образцы джеспилитов. Джеспилиты весьма характерны для многих пустынных месторождений полезных ископаемых. Так, месторождение-супергигант Марганцеворудное Поле Калахари с оксидными рудами типа маматван (браунитовые лютиты) содержит в нижней части формации стратифицированную толщу гематит-кварцевых пород (железистая подформация BIF), что представлена переслаиванием красно-цветных и серо-цветных слоистых железистых силицитов с прослоями джеспилитов [9]. Особый интерес представляет микробиологический / палеомикробиологический аспект проблемы: процессы рудообразования протекали на

постседиментационной стадии преобразования исходного осадка микробальной генетической формы, при том, что это месторождение относится к гидротермально-метасоматическому типу! Возможность характеризовать палеомикробиологический структурно-фоссилизационный аспект, исследуя геологический материал, который содержит джеспилит, корреляционно-спектральными методами, представляет собой крайне интересное направление компаративно-морфологического анализа вещества ископаемых форм, комбинирующего элементы косного, биокосного и биогенного (а некогда – живого) вещества, по терминологии Вернадского.

· В-четвёртых, исследовались образцы кианита. Кианит слабее вышеперечисленных минералов представлен в минералогической летописи, однако в работе Ефремова о географии Западного Тибета, где каменные пустыни с полным отсутствием почв перемежаются районами с преобладанием слюдяных сланцев, указано, что данные слюдяные сланцы обогащены ставролитом, гранатом и кианитом [7]. Коржнев же, анализируя условия формирования рифей-палеозойских вулканогенно-осадочных формаций, связывает первичные проявления кианита с корами выветривания, что становится особо релевантным в аспекте пустынного нахождения этого минерала, так как автором подчёркивается, что в адекватную ему эпоху рифтогенные прогибы Сибирского континента представляли собой межгорные пустыни типа современных пустынь Мертвой долины и Мохаве [8].

· В-пятых, исследовались образцы титанита – минерала, встречающегося в урановой минерализации жильного типа в Восточной пустыне Египта, особо, в двухслудных гранитах [11]. Его релевантность древним пустынным условиям подтверждается, в частности, данными Сиротина с соавторами [15], однако преобладающего значения в нашем анализе он не имеет, хотя, с позиций имэджинговой спектроскопии пород, развиваемой с последней четверти 20-го века [34], а также других дистанционных технологий зондирования и обнаружения минералов заданного состава [26], данный минерал может быть предметом подобного рода идентификации.

· В-шестых, исследовались образцы хромита, который тоже встречается в пустынных условиях, что особо интересно – часто как индикатор алмазоносных пород [16] или «минерал-спутник». Его руды в пустыне часто локализованы с месторождениями металлов платиновой группы [20]. Хромитная минерализация весьма характерна для ультраосновных пород (ультрамафитов / ультрабазитов) пустыни зоны Вади Хадир [25]. Эти хромитные залежи часто бывают ассоциированы с офиолитовыми комплексами [31] и обладают диагностически-выраженным палеомагнетизмом [30]. Композиционные вариации в содержании не только хрома, но и других элементов [21,27] характерны для всех хромитов Восточной Пустыни Египта.

Результаты

1. Галенит

Образец галенита имеет выраженные грани (см., напр., рис. 1-а), проявляющиеся в виде ориентационных элементов на Фурье-спектрах / интегральных пространственных характеристиках (рис. 1-б). При этом интегральная частотная характеристика и статистическая гистограмма спектра для одиночно измеренной грани имеют явно выраженный унимодальный характер. В случае перехода к ROI, на котором наблюдается метамерное повторение рельефа (рис. 2-а), напоминающее волновые типы / формы в

минеральной исчерченности, на Фурье-спектре наблюдается возникновение рефлексов с раздвоением, а статистическая гистограмма приобретает дополнительный пик в распределении и изменение параметров эксцесса и симметрии (рис. 2-б). Углубление в детали строения образца по мере увеличения указывает на наличие подобной текстуры на увеличении 750x и выше (рис. 3-а), что способствует проявлению ориентационных эффектов на их интегральной пространственной характеристике, возникновению удвоенных рефлексов на Фурье-спектре, а также расползанию статистической гистограммы в область «хвостов» распределения с возникновением дополнительно множества текстурно-флуктуирующих пиков, говорящих о соответствующих неоднородностях на поверхности образца (рис. 3-б). Эта исчерченность и фрактографическая картина сохраняется и на затененных участках рельефа, скрытых в щелях (рис. 4-а), однако плохое контрастирование таких деталей приводит к тому, что, при сохранении того же характера ИЧХ как интегральной частотной характеристики, отвечающей за характеристические размеры или масштабы микроструктуры, они не дают того же вклада в «хвосты» диаграммы статистического распределения этих образований, как это свойственно для хорошо контрастированных участков (рис. 4-б). Из небезынересных ROI на образце можно отметить зону с элементами дисперсно-гранулярной текстуры в истонченной (за счёт метасоматизма?) области с некогда существовавшими гранями (рис. 5-а). В ней фиксируются рефлексы Фурье-спектра, относящиеся как к ориентации грани, так и к собственным тенденциям в ориентации частиц (рис. 5-б). В то же время, статистическая гистограмма теряет свойственные для предшествующих ROI максимумы и смещается вправо, сильно уменьшая асимметрию (0.86 – хотя ранее в аналогичных случаях было от 1.14 до 1.69, не считая случая метамерных текстур), а также эксцесс (0.29 – хотя ранее было от 0.98 до 2.4). Таким образом, взятые на разных масштабах ROI с текстурами образца, в которых проведены измерения, позволяют характеризовать его структуру в большей степени, чем интегральная оценка на одном масштабе в одном произвольно избранном, в силу технических ограничений, ROI. С другой стороны, показано, что для данного минерала метод применим и позволяет характеризовать структуру. Однако для точного компаративного описания, позволяющего производить сравнение с другими потенциально-релевантными минералами, нужно произвести поиск и дифференциацию подобных структур / ROI у других релевантных минералов – что и будет сделано в дальнейшем, начиная с примера магнетита.

2. Магнетит

Рассмотрение образца магнетита рационально начать с дисперсно-гранулярной текстуры, которая подобна соответствующей (последней рассмотренной) текстуре галенита, однако должна каким-то образом отличаться от неё, чтобы обладать собственным «фингерпринтом» или сигнатурой (ИЧХ, ИПХ и т.д.). Рассмотрение дисперсно-гранулярной текстуры (рис. 6-а) указывает на бимодальную ориентацию частиц магнетита и их вытянутую форму, вычислимую через ИПХ, хотя статистика у данного образца в корне отличается от статистики галенита (рис. 6-б). В статистике наличествует, в частности, дополнительный пик в дальней хвостовой области, а начинается гистограмма с более пологой, чем у предшествующего минерала атаки (ADSR-развертки). В генеральном ракурсе этот образец имеет существенную текстурную исчерченность, которая визуализируется даже в сильном контрасте и при частичной зарядке выходящих на поверхность обнажений (рис. 7-а), однако метод корреляционно-спектрального электронно-микроскопического анализа хорошо работает только на достаточной выборке масштабов, характеризующих текстуру, в мультимасштабном варианте. Это, в свою очередь, может быть доказано от противного «статистической

изотропией ROI образца при данном слабом (75x) увеличении, очевидной из рассмотрения аддитивного Фурье-спектра и ИПХ (рис. 7-б), хотя это не соответствует отдельным исчерченным областям визуальной картины (рис. 7-а). При ближайшем рассмотрении данной выделенной текстуры (рис. 8-а) и построения её ИПХ и статистической гистограммы, как правило, оказывается возможным выделить чёткие рефлексы, свидетельствующие о наличии ориентированных структур (рис. 8-б), а гистограмма оказывается, в большинстве случаев контрастной визуализации, существенно более узкой. Аналогично, для ряда дисперсно-гранулярных структур магнетита (рис. 9-а) при ближайшем увеличении (ср. с рис. 6-а) обнаруживается выраженная ориентация ИПХ и спектра (ср. рис. 9-б и рис. 6-б), однако дисперсия по размером или, в альтернативном смысле, гетеродисперсность визуализируемой фракции – хотя это может быть видно и по изображению – приводит к размыванию статистической гистограммы, а также некоторому уширению интегральной пространственной характеристики. Этим магнетит на практике отличается от иных минералов, в частности – от первого упомянутого образца (галенита, также обладающего элементами гранулярной текстуры).

3. Джеспилит

Образцы джеспилитов невозможно не отличить от иных образцов, особенно – при индивидуально-целевой аналитике в статистически-репрезентативных для него ROI, содержащих гранулы и иные элементы с очень развитой структурой (рис. 10-а), выявляемой по Фурье-спектру (рис. 10-б). ИПХ этих структур имеет «двухлепестковое» распределение, но на Фурье-спектре визуализируется его тонкая структура, не препятствующая унимодальному характеру узкого распределения (рис. 10-б). При небольшом изменении пространственной дискретизации можно охарактеризовать частицы на меньшем увеличении относительно числа используемых сенсорных элементов зоны ROI (КМОП). При таком исследовании обнаруживается S-образный характер Фурье-спектра (см. рис. 10-в), что стало основой для рабочего наименования подобных частиц S-Фурье-спектральными частицами. Эти частицы обладают рекордной статистической различимостью при асимметрии 8.52 и эксцессе 111.44. Часто встречаются также сдвоенные частицы (рис. 11-а) с теми же особенностями, однако их Фурье-спектры более размыты и ортогонализированы, а статистическая гистограмма уширена в сравнении с одиночными – что сопровождается уменьшением асимметрии до 4.92, а эксцесса – до 28.04 (рис. 11-б). В образцах джеспелитов встречаются также мультигранулярные образования, по физическим причинам, являющиеся, вероятно, продуктами агрегации (рис. 12-а). Это рассеяние по характеру спекл-подобной текстуры Фурье-спектра визуализируется достаточно эффективно, что не препятствует визуализации усредненной ориентации подобных частиц, а при высоком значении аппаратного контраста приводит к вырождению статистической гистограммы до унимодального (1 столбец) уровня (рис. 12-б), в силу чего подтверждается гипотеза о приблизительном равенстве по размерам слагающих данные агрегаты микроструктур. Не исключено биогенное происхождение и аутогенная фоссилизация микропалеонтологических структур в подобных джеспилитах.

4. Кианит

Образец кианита при малых увеличениях малоинформативен (рис. 13-а), однако преобладающие ориентации, отличающие его от вышерассмотренных минералов, хорошо визуализируются, также как и качественно отличающий его от них характер гистограмм – исходно широкий, с «хвостами» (рис. 13-б). Элементы более тонкой микроскульптуры, видимой при тех же или ещё меньших, чем первичные 200x увеличениях от 100x (рис. 14-а), обладают той же выраженной ориентацией (рис. 14-б), не меняющейся при

увеличении до 350х, сужающем гистограмму (рис. 15-а, рис. 15-б), хотя рефлексы ортогональной ориентации при 350х на Фурье-спектре уже присутствуют (рис. 15-б). На практике, наивысшей детализации с сохранением ориентации удаётся достигнуть при 1000х (рис. 16-а, рис. 16-б). При повороте столика на 90 градусов текстуры изменяют ориентацию, что видно, в частности, по сопоставлению рис. 16-а и рис. 17-а, а также результатов их обработки на рис. 16-б и рис. 17-б соответственно. Линейная исчерченность, сохраняющаяся при повороте оси симметрии аппаратным путём, как показала практика, является характеристическим «фингерпринтом» или же сигнатурой интегральной пространственной характеристики для всех ROI исследованных нами.

5. Титанит

Несмотря на визуальную слабую текстурность (если не сказать «аморфность» о некоторых ROI), в реальности, образец титанита обладает множеством контрастных включений, что говорит о фазах, отличающихся по электрическим свойствам от окружения при анализе под электронным пучком. В результате, ROI с такими структурами (рис. 18-а, рис. 19-а) характеризуются выраженными, по метрологическим критериям, рефлексами и элементами анизотропии (рис. 18-а, рис. 18-б). В то же время, аналогичные ROI с того же кадра, но без включений (ср. ROI на рис. 19-а и рис. 20-а) вовсе не имеют выраженных рефлексов, по корреляционно-спектральным данным (ср. рис. 19-б, рис. 20-б). Элементы рефлексов подобного рода проскальзывают и на больших увеличениях до 1500х, что также контролируется по интегральной пространственной характеристике и рефлексам на Фурье-спектре (рис. 21-а, рис. 21-б).

6. Хромит

Хромит, относясь наряду с другими хромшпинелидами к группе (семейству) шпинели, являясь крайним членом изоморфного ряда хромшпинелидов переменного состава «магнезиохромит— хромит» класса оксидов, характеризуется неровным изломом и, почти, отсутствием спайности. Так как вид излома зависит от механических свойств минерала (хрупкость, ковкость и другие), от кристаллической структуры (наличие или отсутствие спайности, степень её совершенства и др.), от характера сростаний в агрегатах минералов, величины и формы зёрен в них, логично полагать, с физико-механических позиций, информативной структуру излома и её фингерпринты / сигнатуры, получаемые методами корреляционно-спектрального анализа. Металлический блеск поверхности, как правило, затрудняет определение ориентации при количественной стереомикроскопии в Vis- и UV- диапазонах, поэтому только корреляционно-спектральный анализ электронной микрографии, в принципе, способен дать достаточно качественное определение ориентации вне оптического или УФ-диапазона. Представленный на рис. 22-а образец хромита с выделенным регионом интереса не даёт визуальной индикации ориентации морфометрируемых компонент, что затрудняется также и рельефом поверхности. В то же время, в анализе Фурье-спектра и интегральной пространственной характеристики (рис. 22-б) чётко определяется ориентация структурных элементов образца. Кроме того, при увеличении до уровня одиночных граней (750х) можно видеть наличие «насечек» излома минерала, которые располагаются параллельно друг другу и образуют элемент, повторяющийся на кадре (рис. 23-а) столько раз, что это является репрезентативным для регистрации в Фурье-спектре и интегральной пространственной характеристике (рис. 23-б). Элементы тонкой структуры излома могут быть идентифицированы и при меньших увеличениях, несмотря на контраст фокус-уровней проникновения (эффективной глубины пробега) электронного пучка: даже для микрофотографий с едва оптимизированным уровнем контраста (см. рис. 24-а и рис. 25-а) возможно визуализировать ориентацию структурных элементов и

обнаружить тонкие дифракционные компоненты в текстуре рассеяния в Фурье-спектре (рис. 24-б, рис. 25-б). Тонкие ориентационные рефлексы (по аналогии с микрокристаллографическим анализом) можно выделить на различных участках образца хромита, независимо от областей паразитной засветки (которые могли бы являться предметом критического анализа, дисквалифицирующего возможности метода), как это можно видеть, сравнивая рис. 26-б, являющийся корреляционно-спектральным «портретом» рис. 26-а на ROI с паразитной засветкой, и рис. 27-б, являющийся аналогичным корреляционно-спектральным «портретом» для региона без засветки (рис. 27-а). Аналогично доказывается независимость наличия главного (ортогонального к оси проекции) рефлекса для зоны образца, показанной на рис. 28-а, рис. 29-а (соответствующие им корреляционно-спектральные «портреты» даны на рис. 28-б, 29-б соответственно). Более того, для более морфометрически богатой текстуры на рис. 29-а наблюдаются два дополнительных Фурье-спектральных рефлекса. Надо сказать, что уширение ROI неблагоприятным образом действует на структурный «фингерпринтинг» хромита (как и иных минералов). Для примера приводятся кадры электронных микрофотографий и их корреляционно-спектральные фингерпринты с разными ROI: кадр с широким ROI, обеспечивающим статистическую репрезентативность анализа по широкому полю образца, даёт ложно-отрицательный вывод об отсутствии существенно-ориентированных по одной из осей структурных компонент (рис. 30-а, рис. 30-б), однако тот же кадр с узким ROI даёт, в случаях его позиционирования на выступающей и импактной области, качественно различные по ориентации (причём – демонстрирующие наличие узко-ориентированных ИПХ и компонент ИПХ) и гистограмме спектра корреляционно-спектральные фингерпринты (рис. 31-а, 31-б, рис. 32-а, 32-б, соответственно).

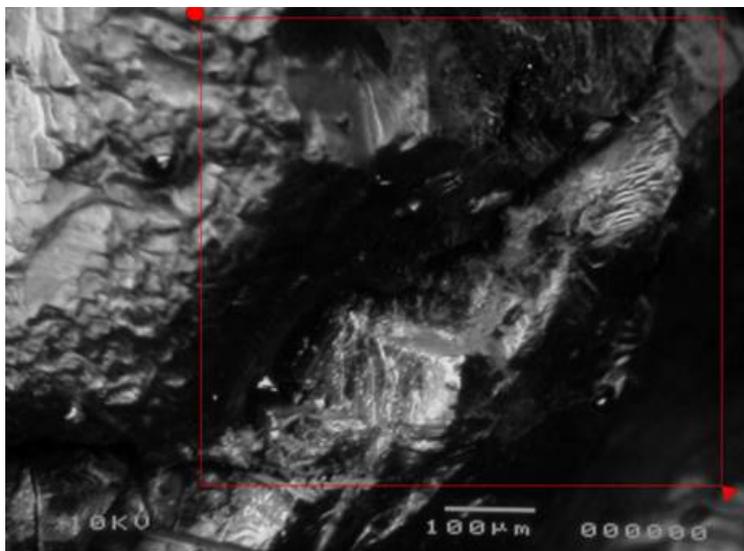


Рис. 1-а: Электронная микрофотография с выделенным ROI, подвергшимся корреляционно-спектральному анализу в реальном времени [далее везде для нечётных фигур с литером «а»]

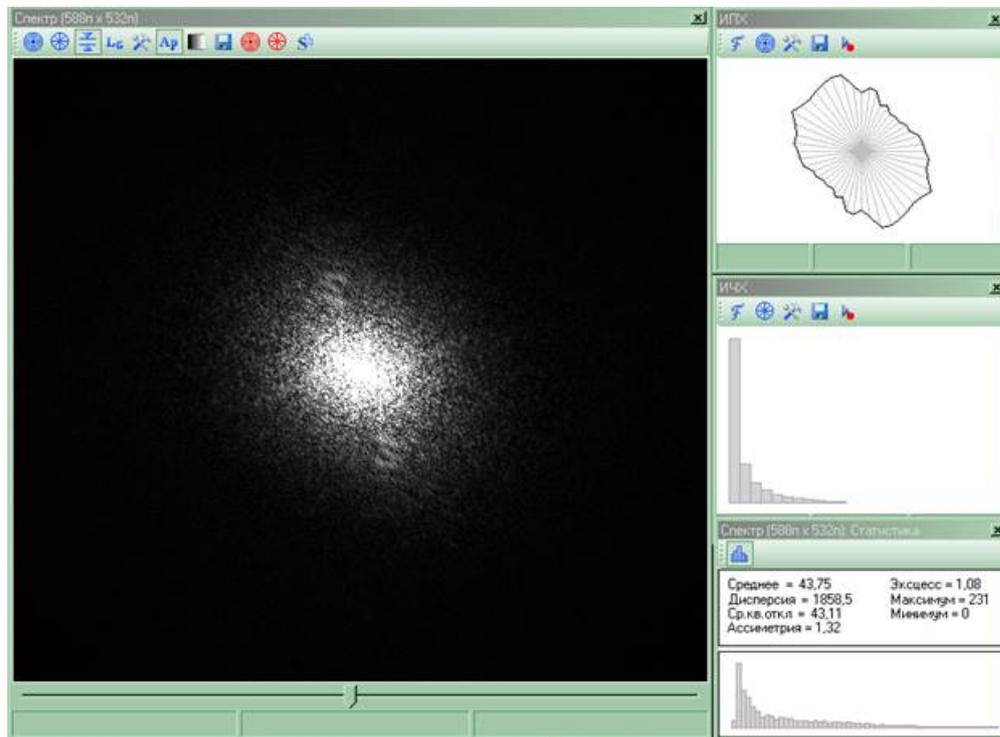


Рис. 1-б: Фурье-спектр, интегральная пространственная характеристика (ИПХ) и интегральная частотная характеристика (ИЧХ), статистика для спектра (среднее, дисперсия, ср. кв. отклонение, асимметрия, эксцесс, максимум, минимум, гистограмма распределения) [далее это обозначение верно везде для чётных фигур с литером «б»; описания образцов см. в тексте].

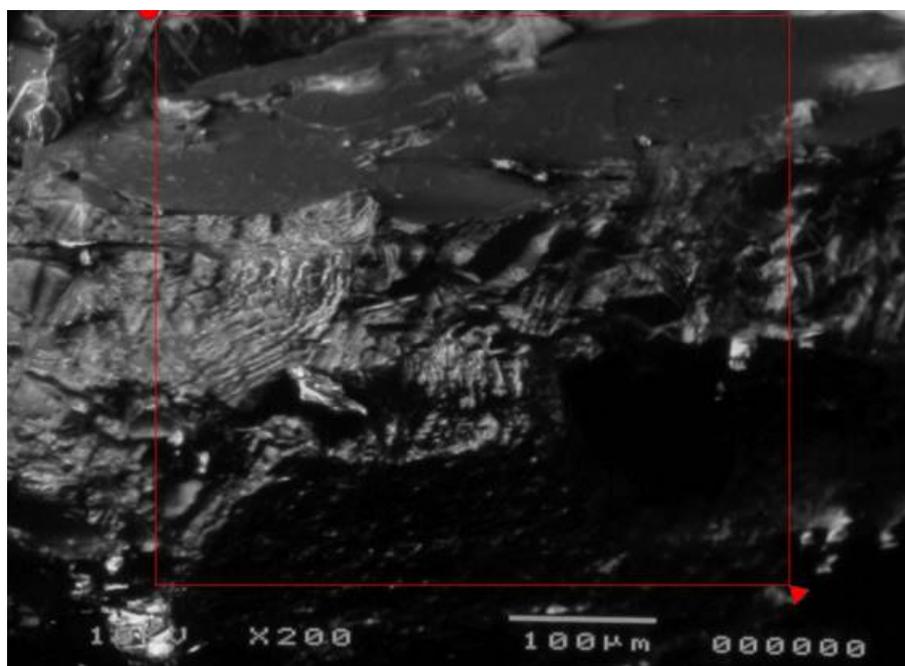


Рис. 2-а

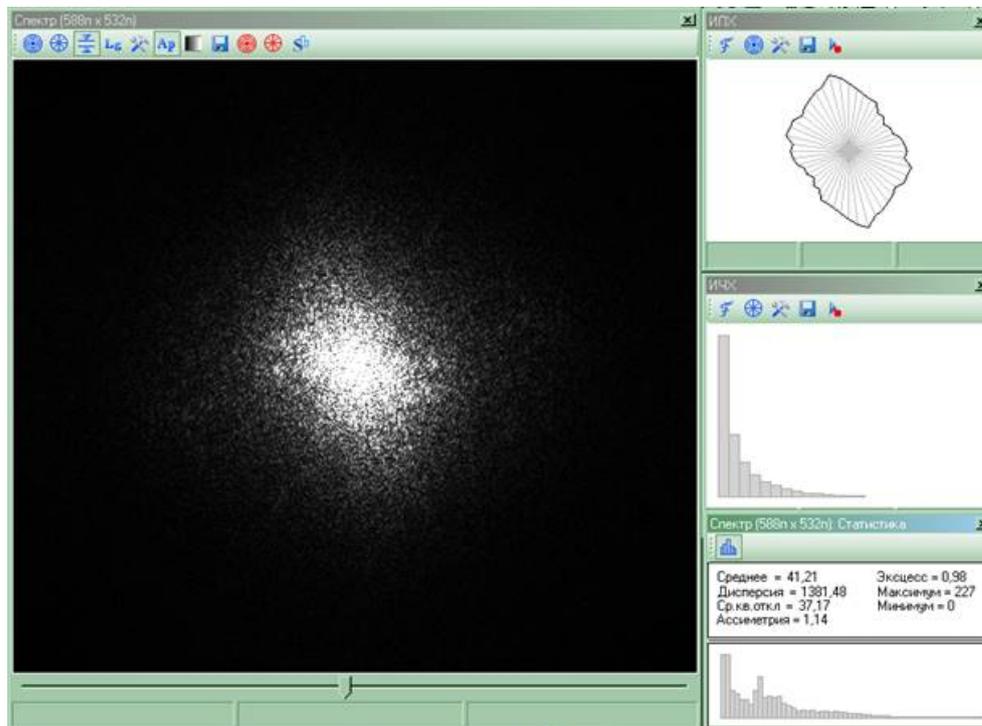


Рис. 2-б

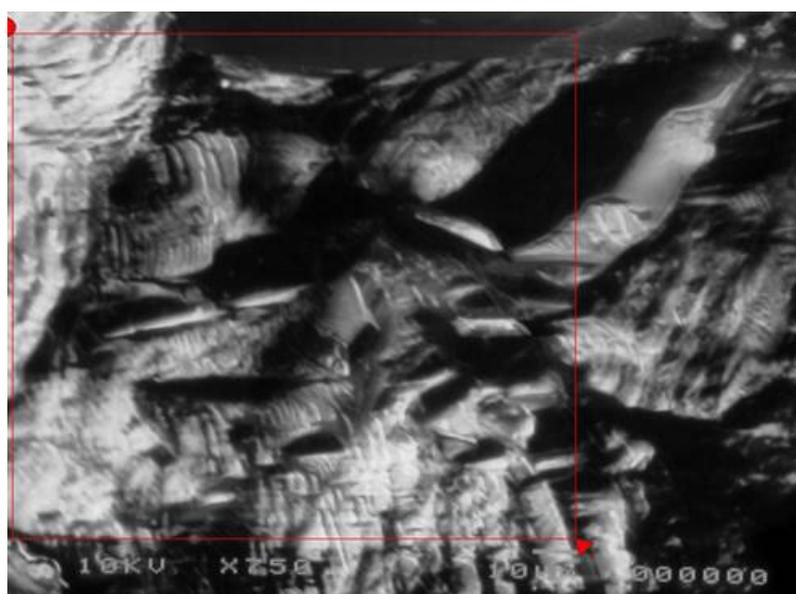


Рис. 3-а

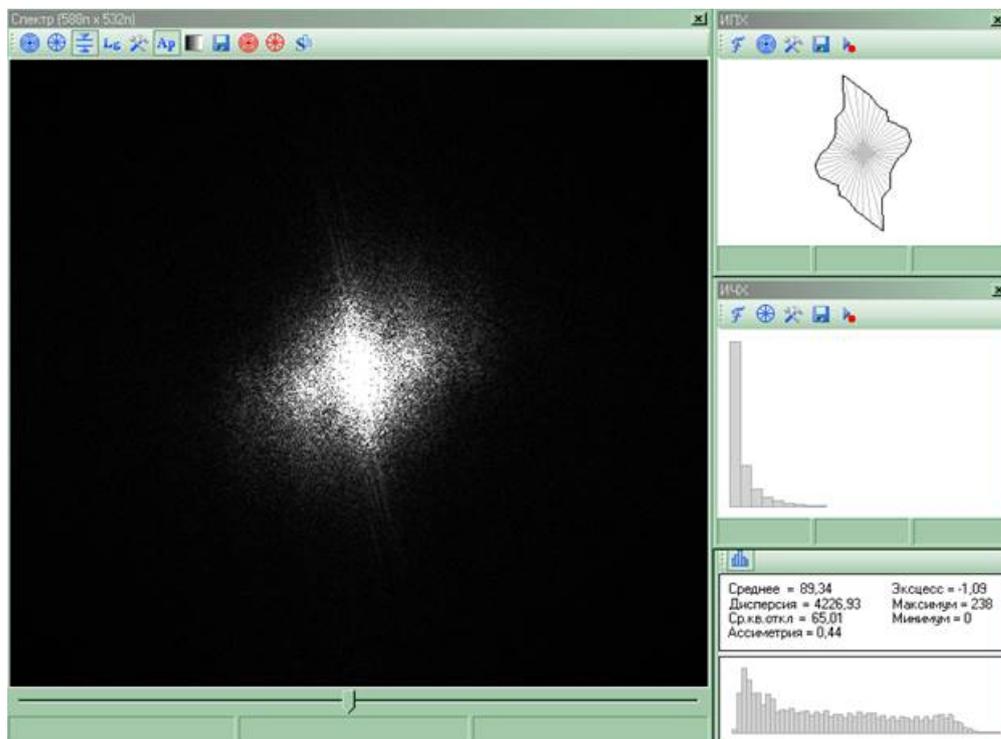


Рис. 3-б

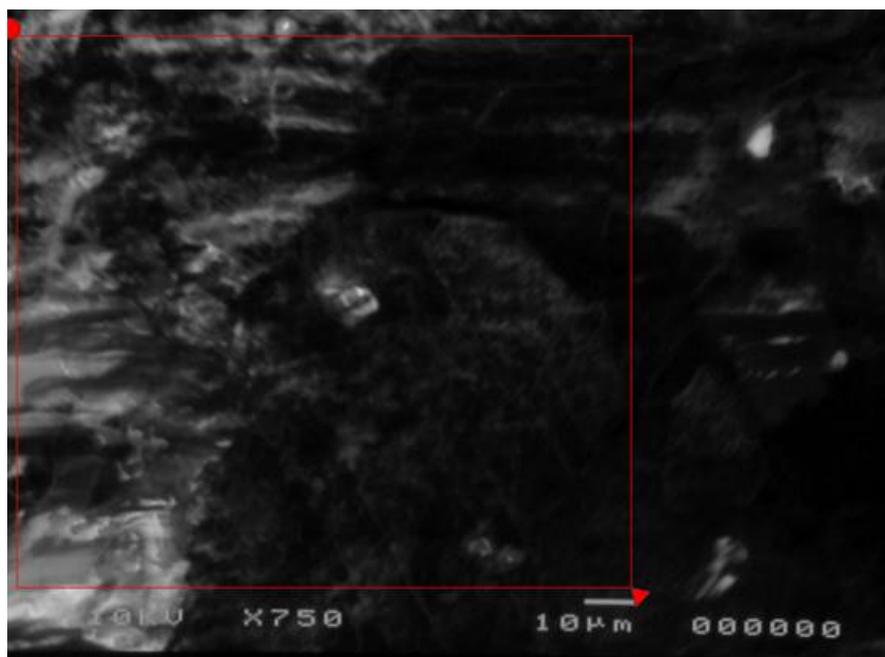


Рис. 4-а

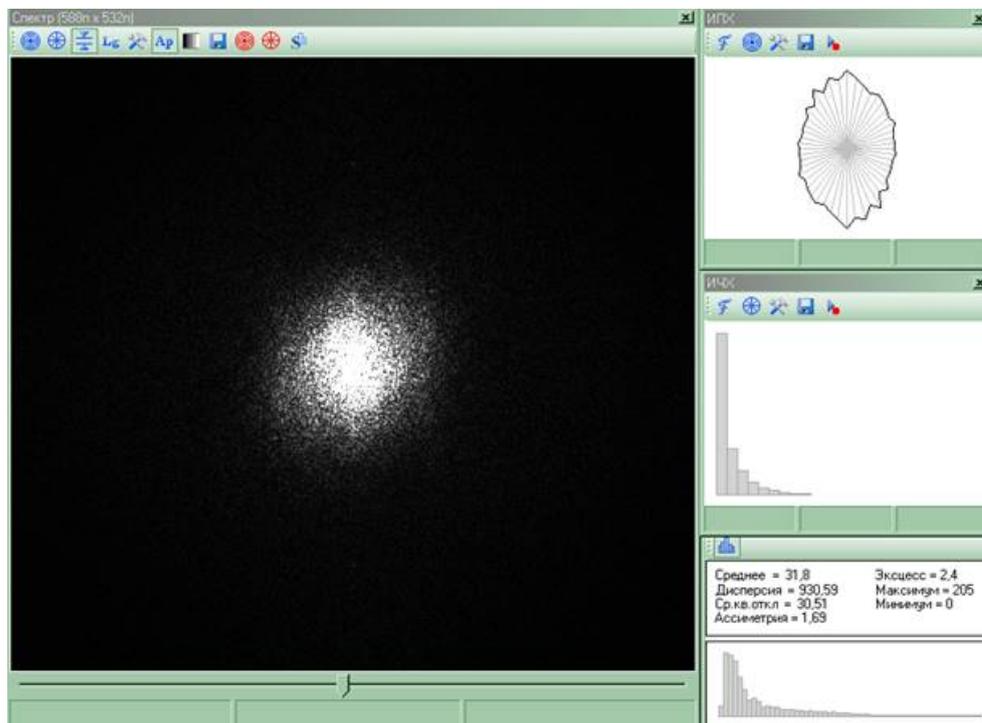


Рис. 4-б.

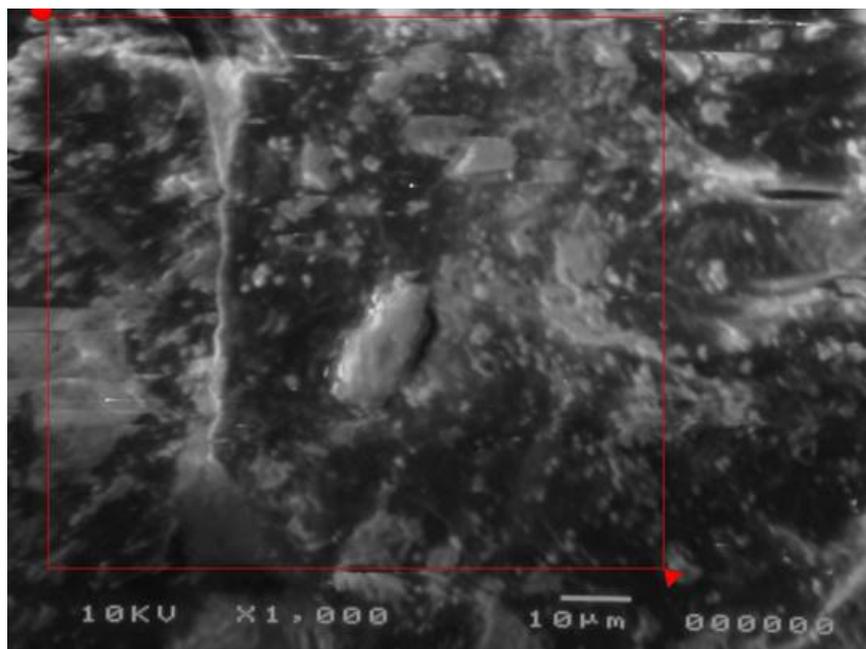


Рис 5-а

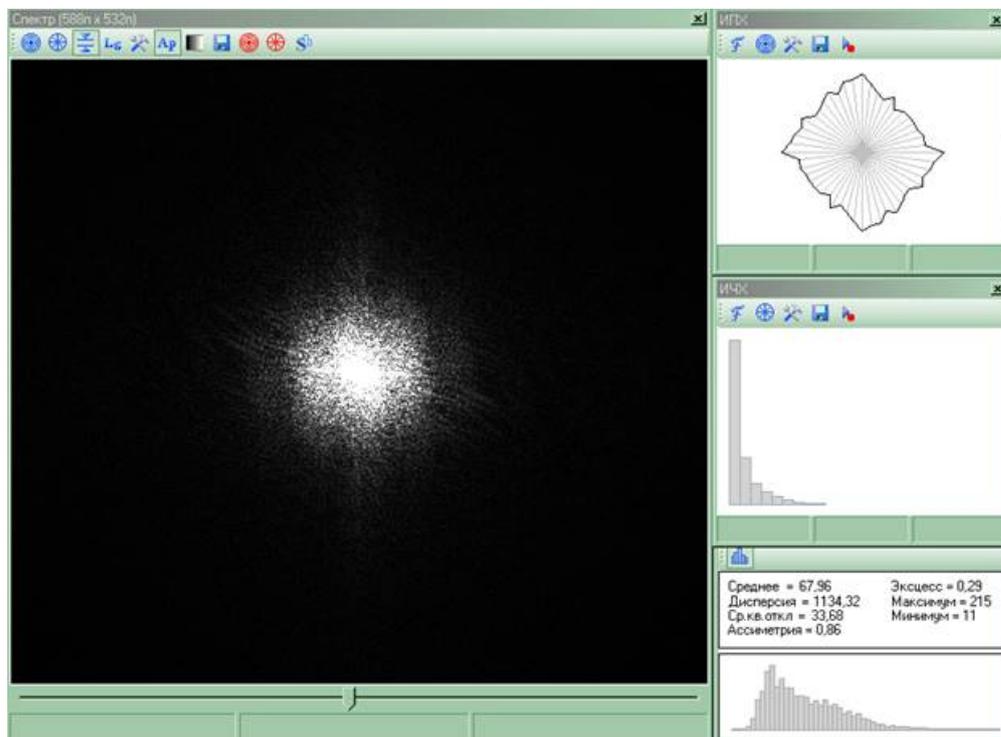


Рис. 5-б

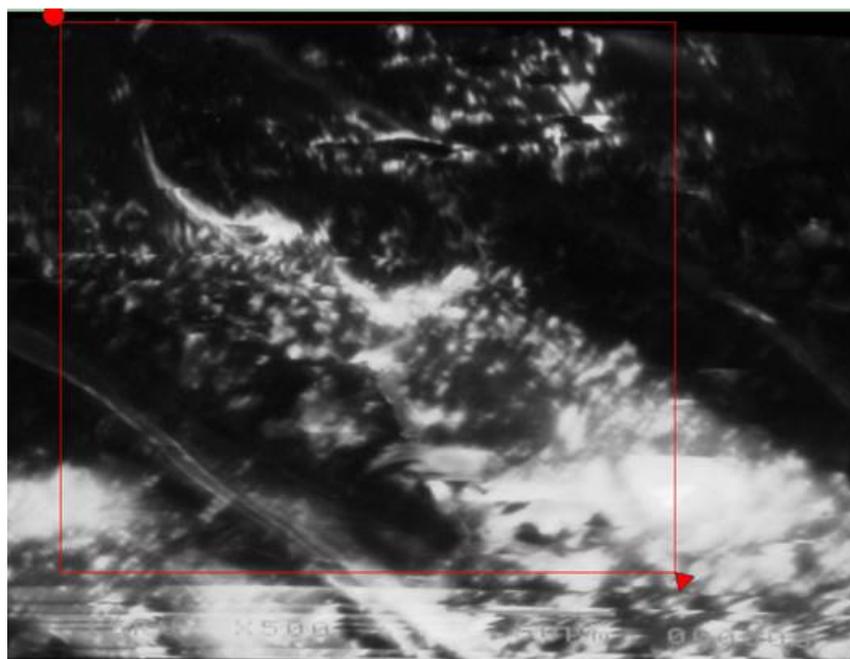


Рис. 6-а

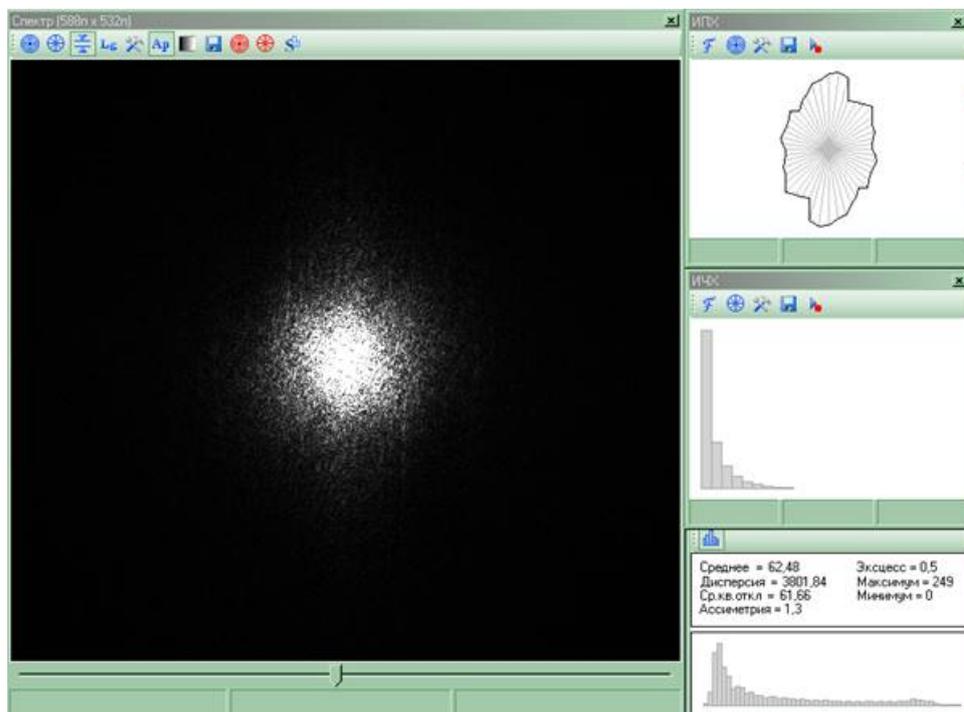


Рис. 6-6

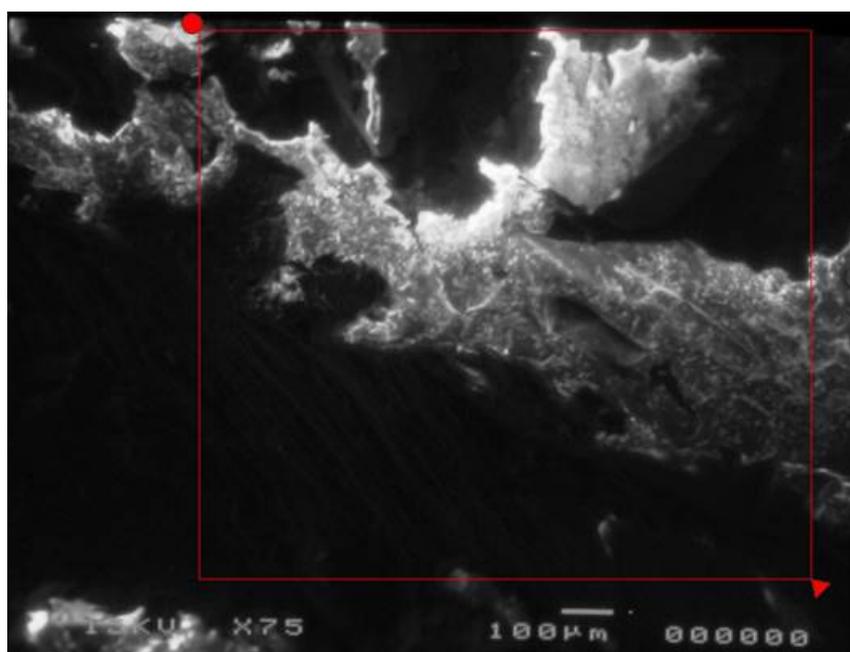


Рис. 7-а:

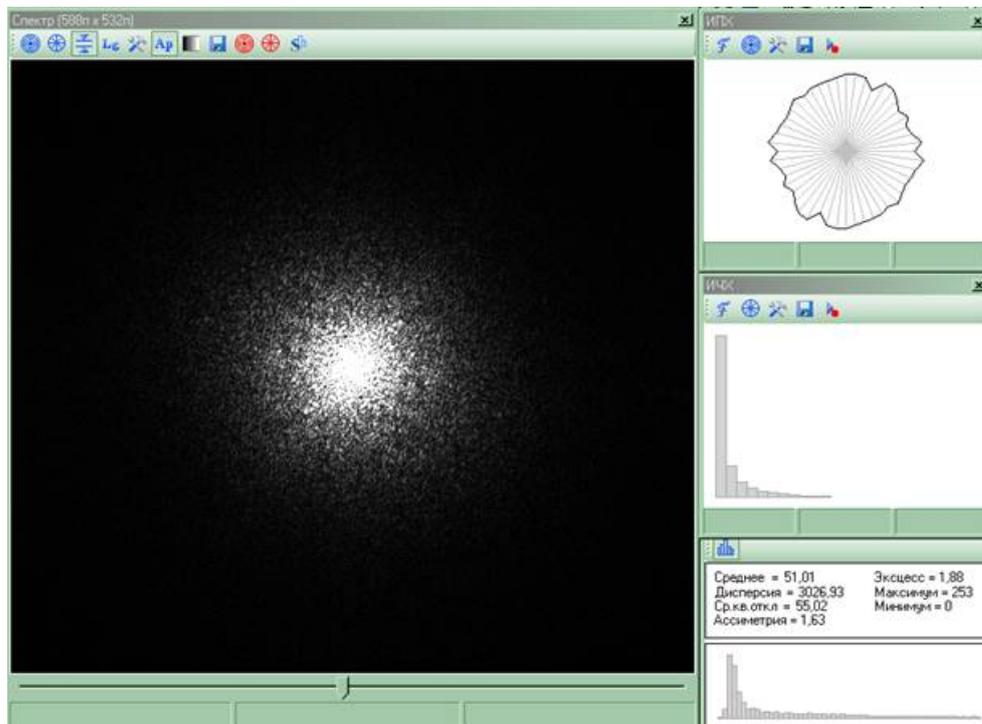


Рис. 7-б

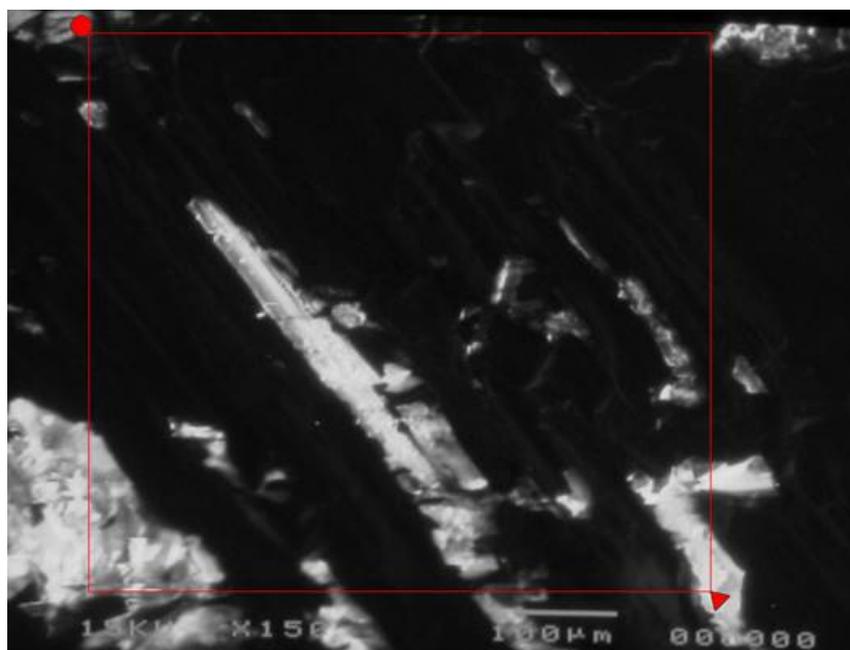


Рис. 8-а:

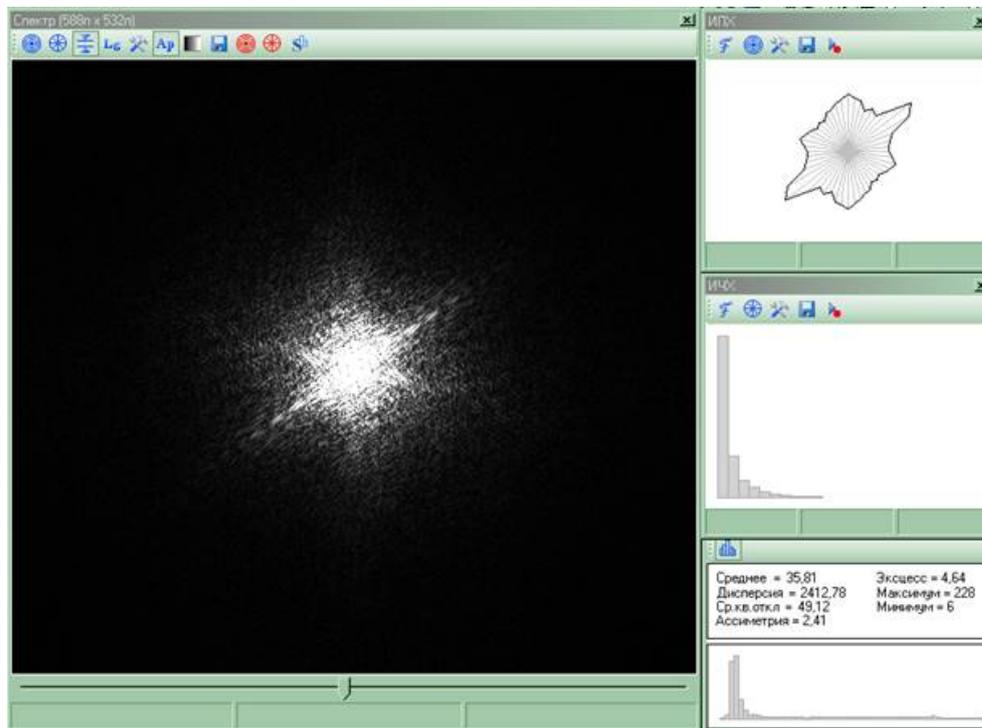


Рис. 8-6

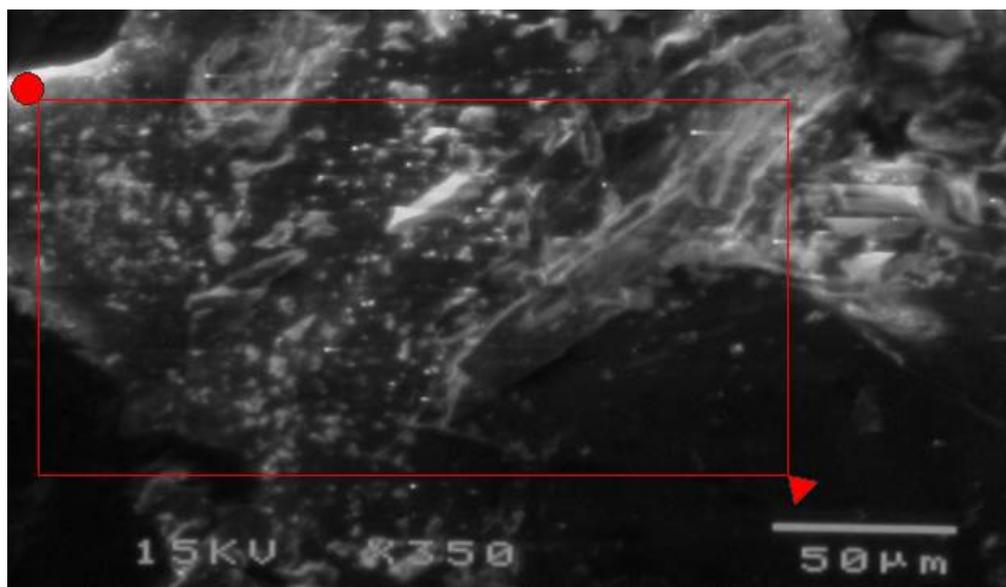


Рис. 9-а

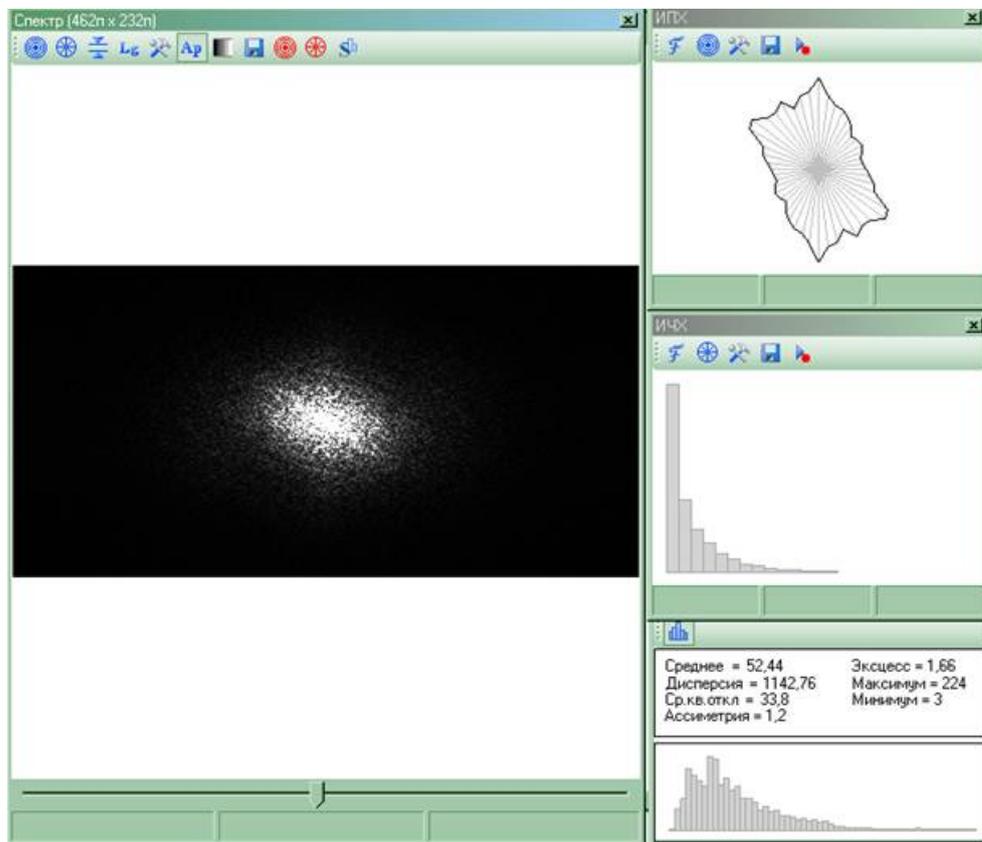


Рис. 9-6

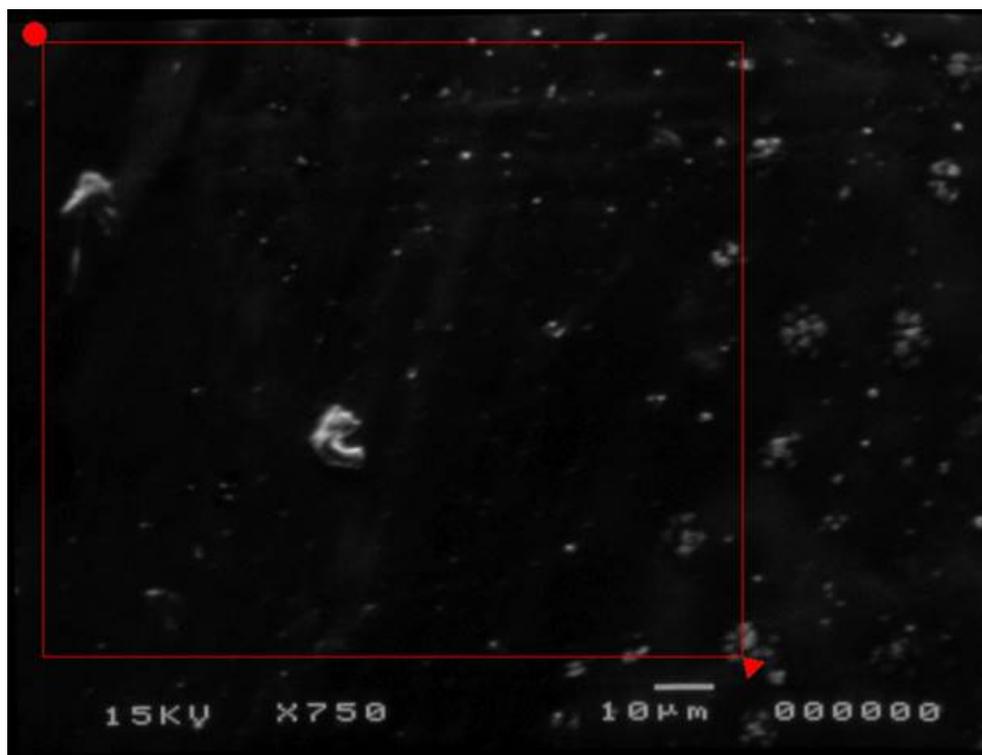


Рис. 10-а

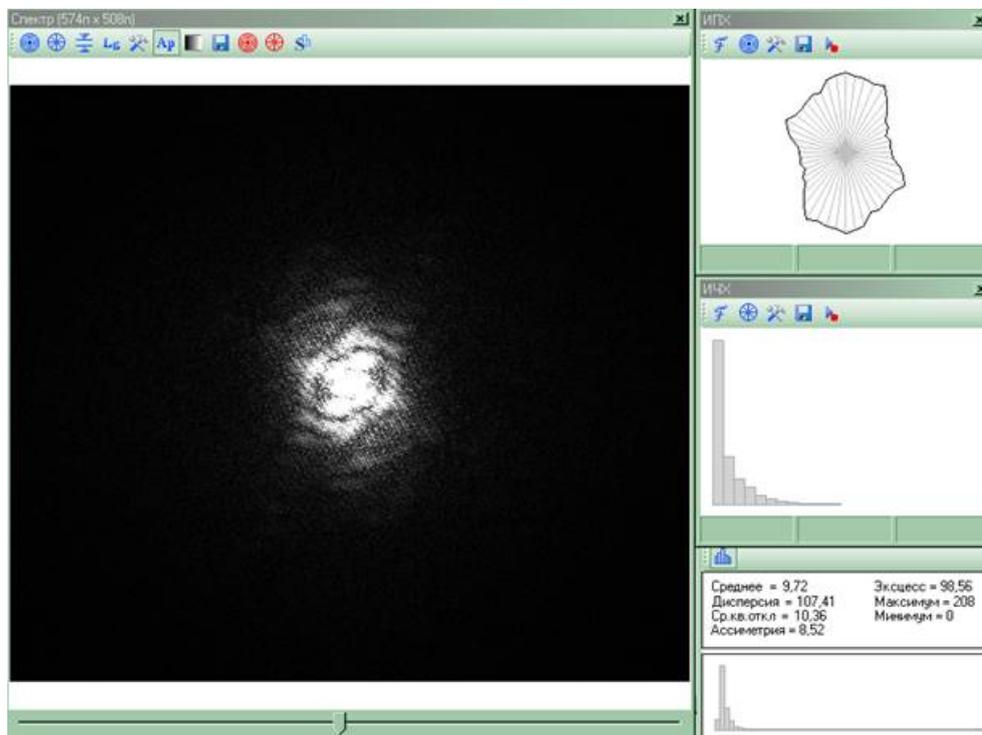


Рис. 10-б

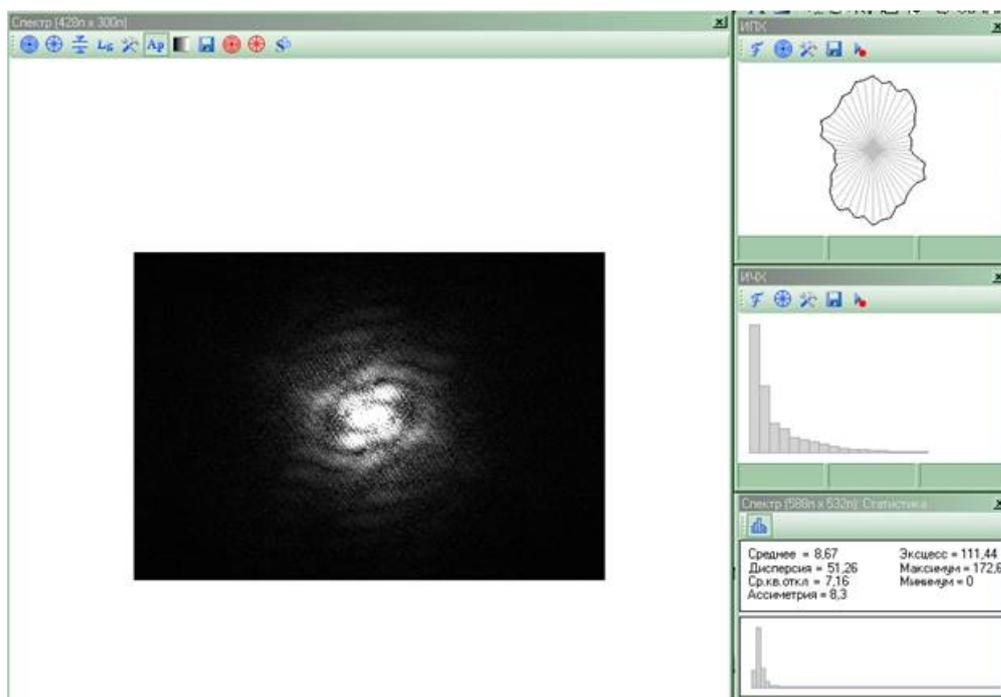


Рис. 10-в

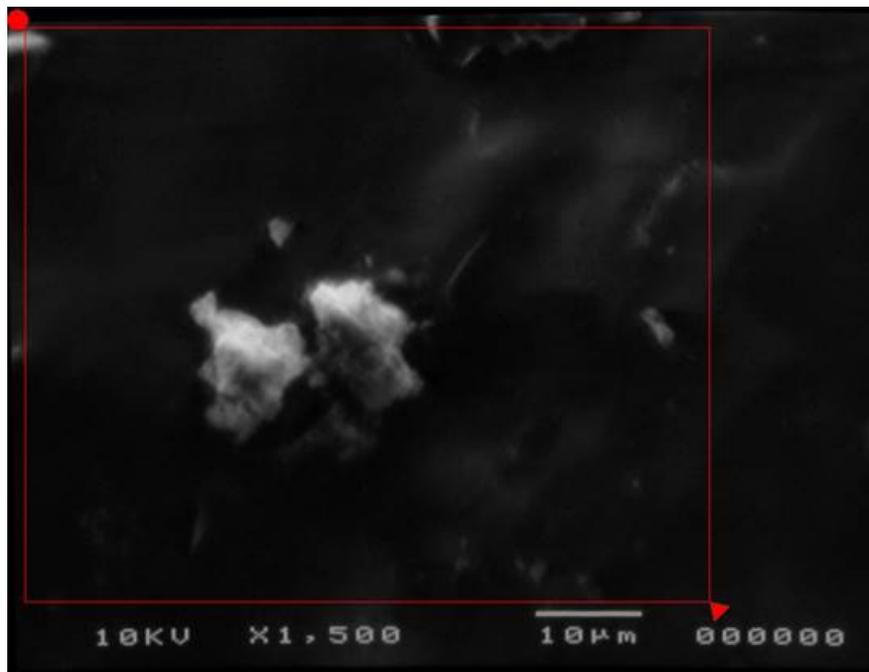


Рис. 11-а

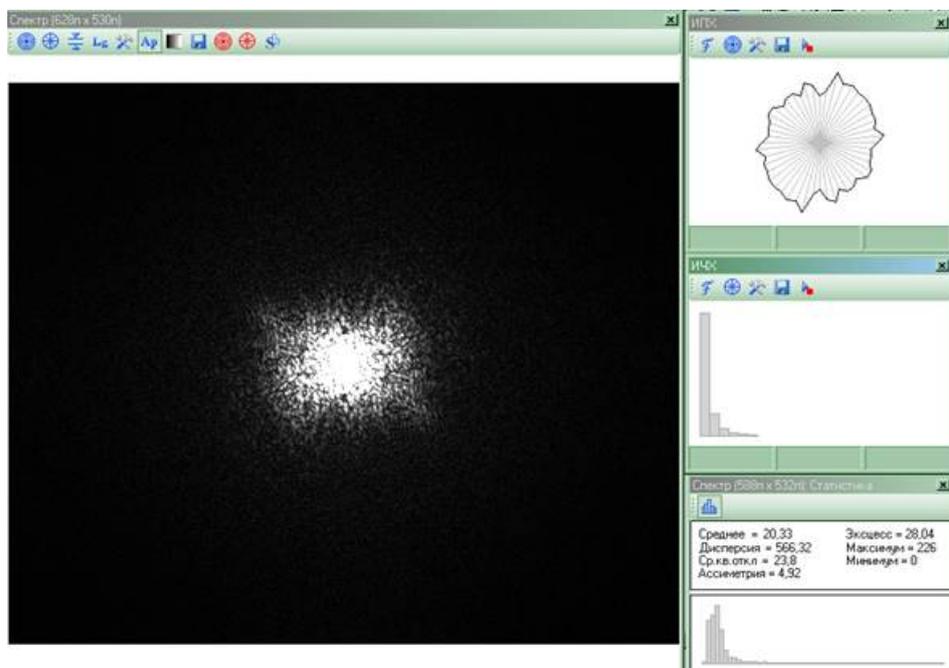


Рис. 11-б

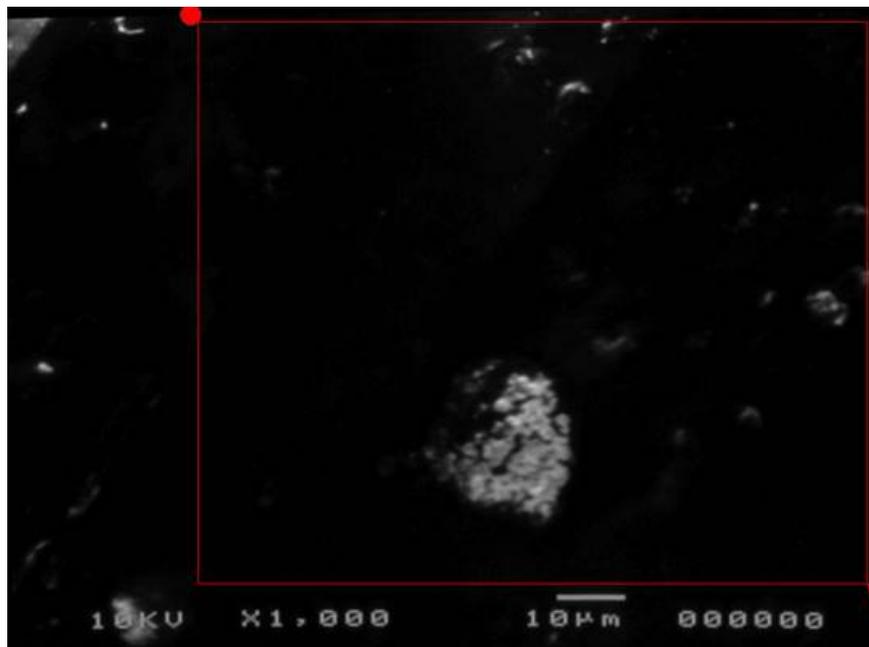


Рис. 12-а

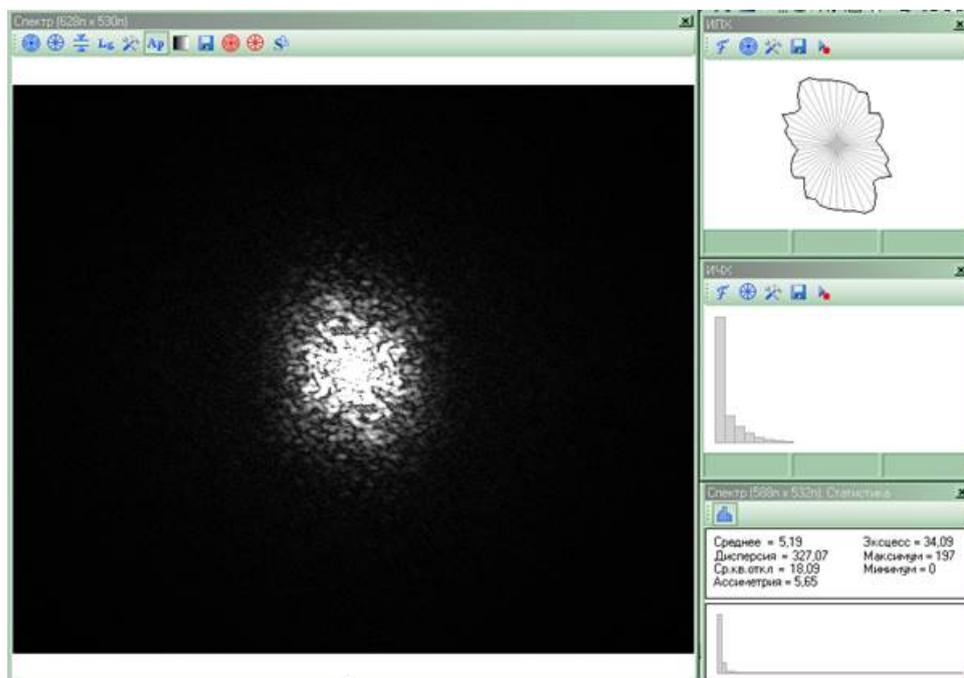


Рис. 12-б

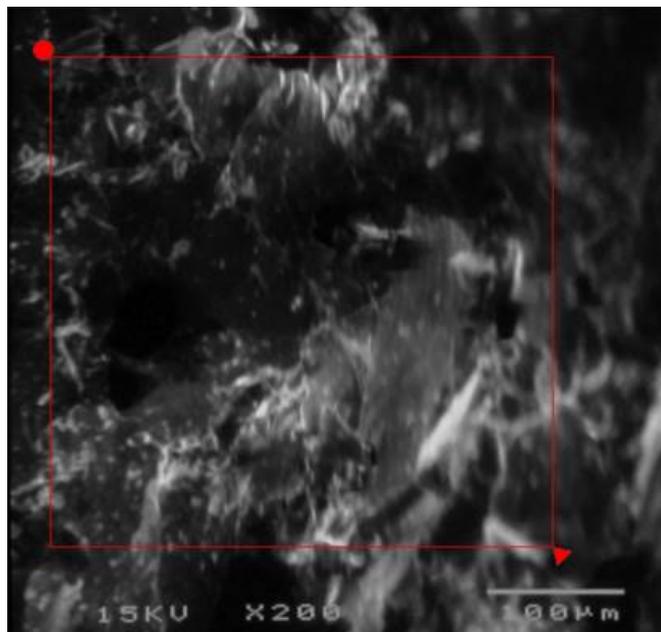


Рис. 13

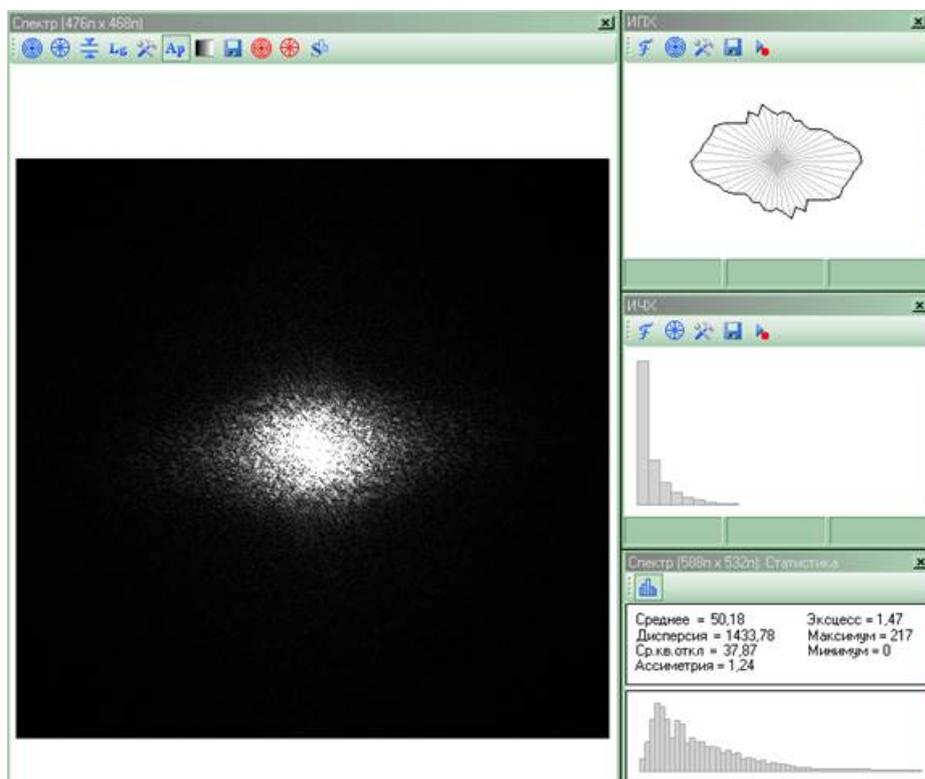


Рис. 13-6:

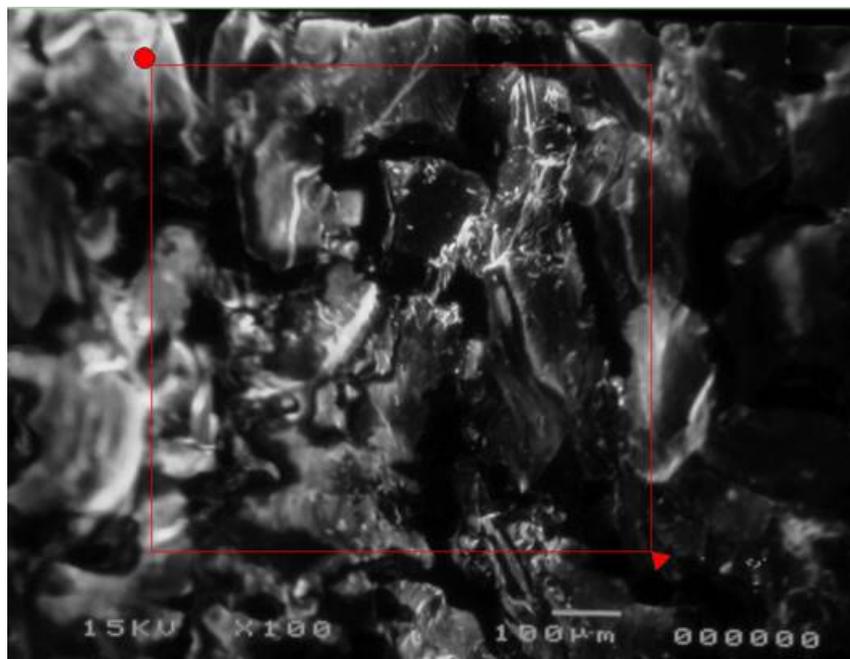


Рис. 14-а

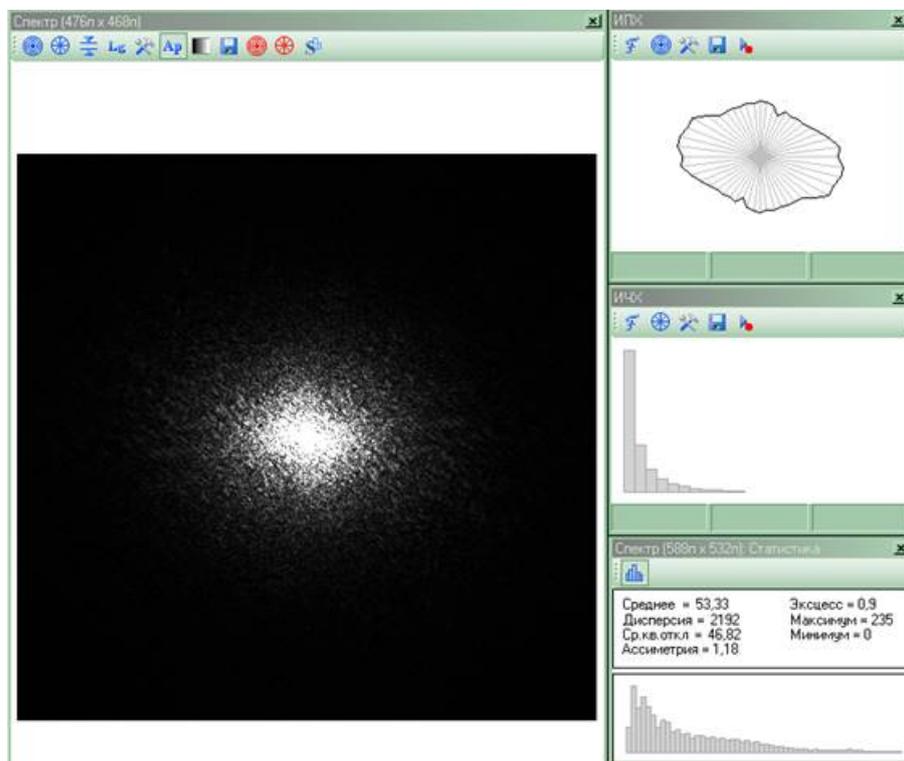


Рис. 14-б

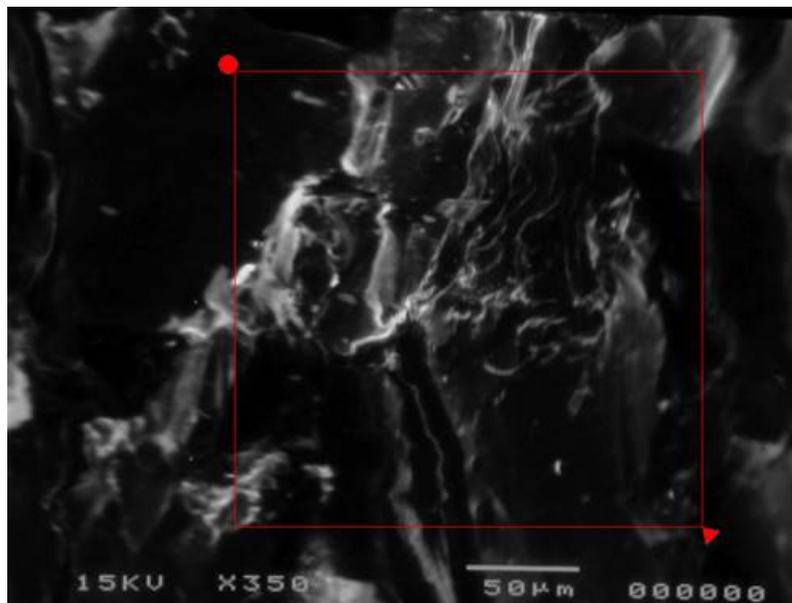


Рис. 15-а

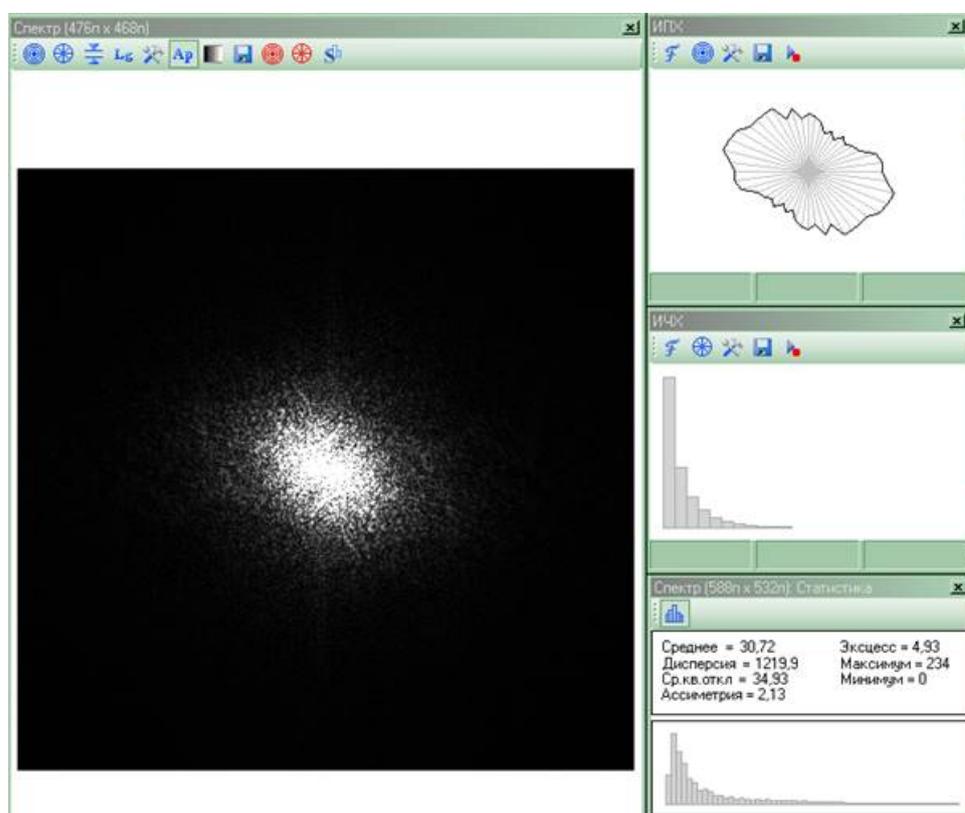


Рис. 15-б

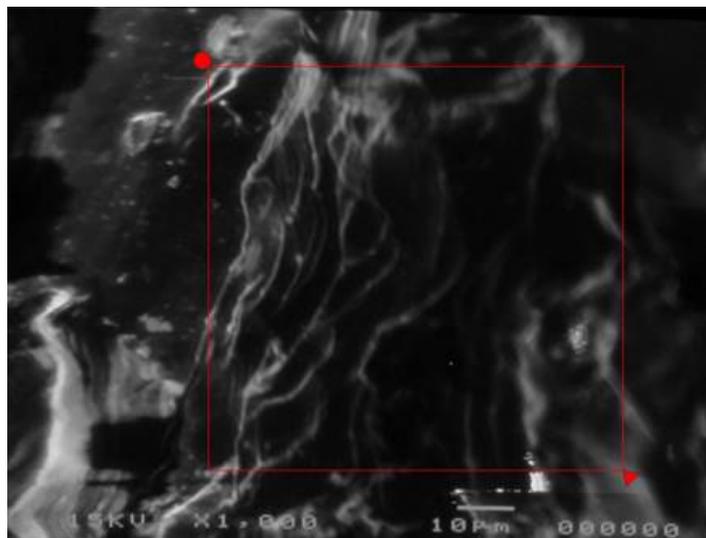


Рис. 16-а

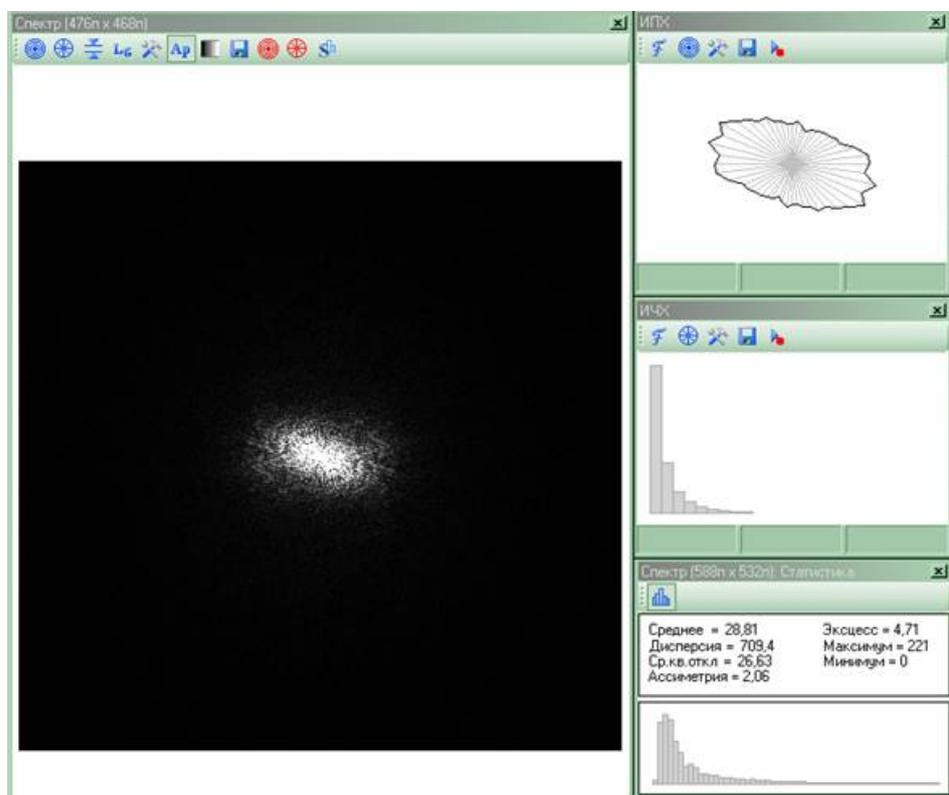


Рис. 16-б

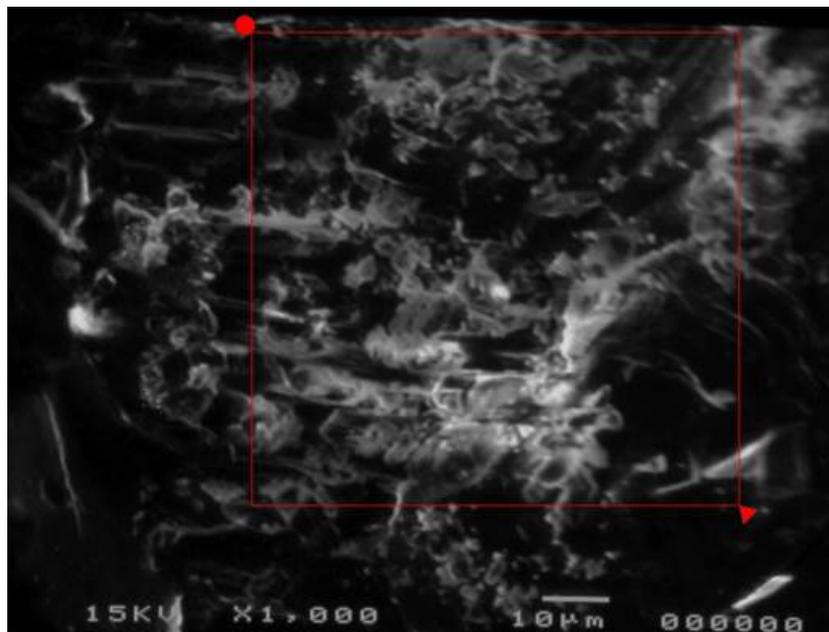


Рис. 17-а

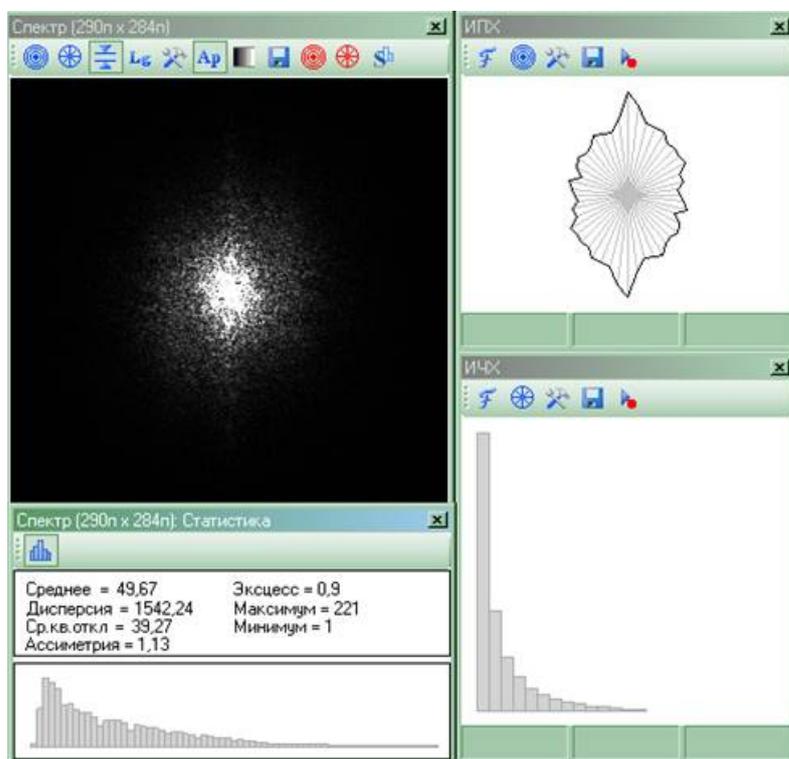


Рис. 17-б

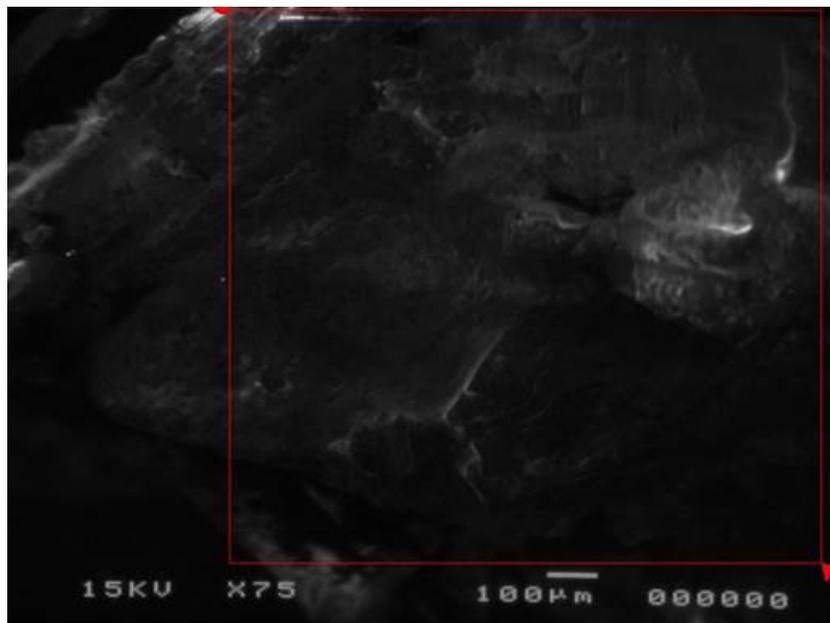


Рис. 18-а

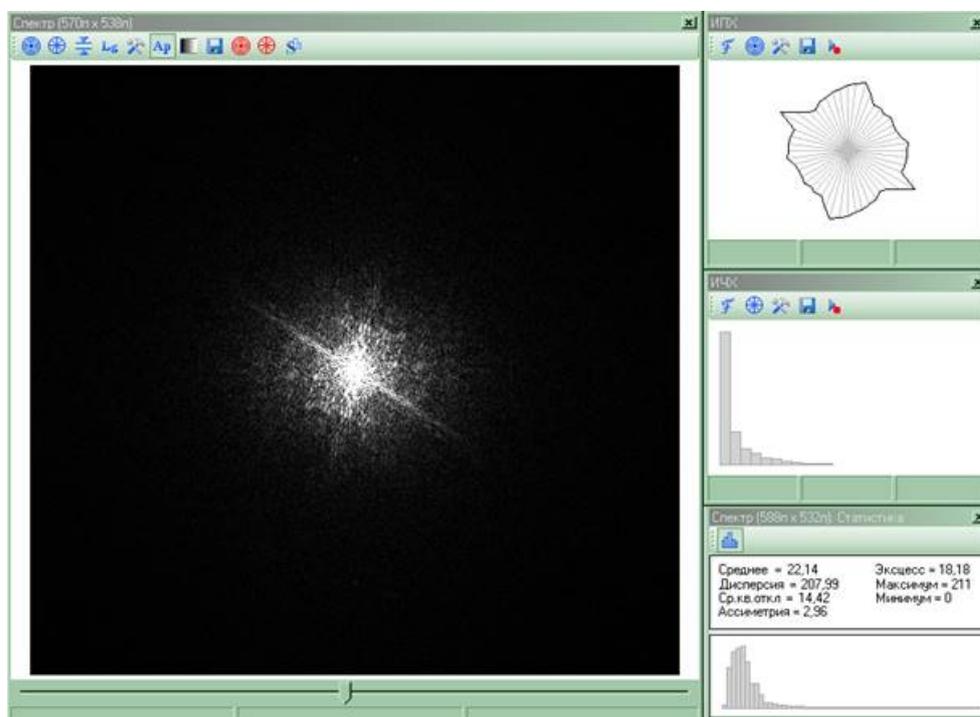


Рис. 18-б

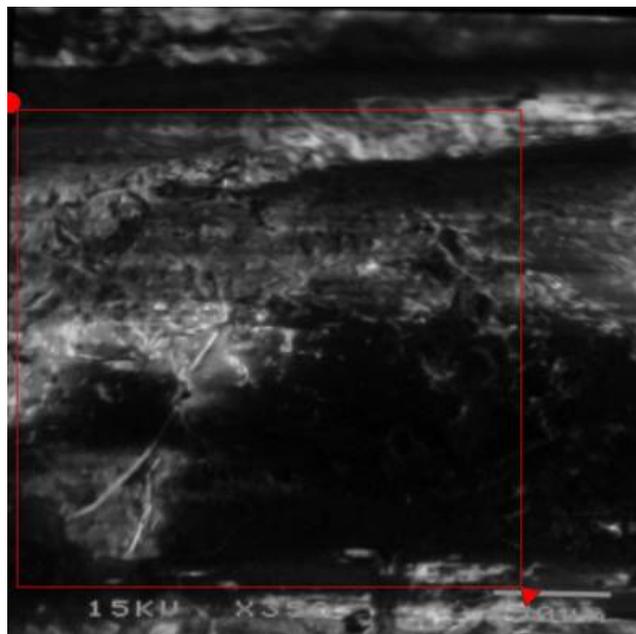


Рис. 19-а

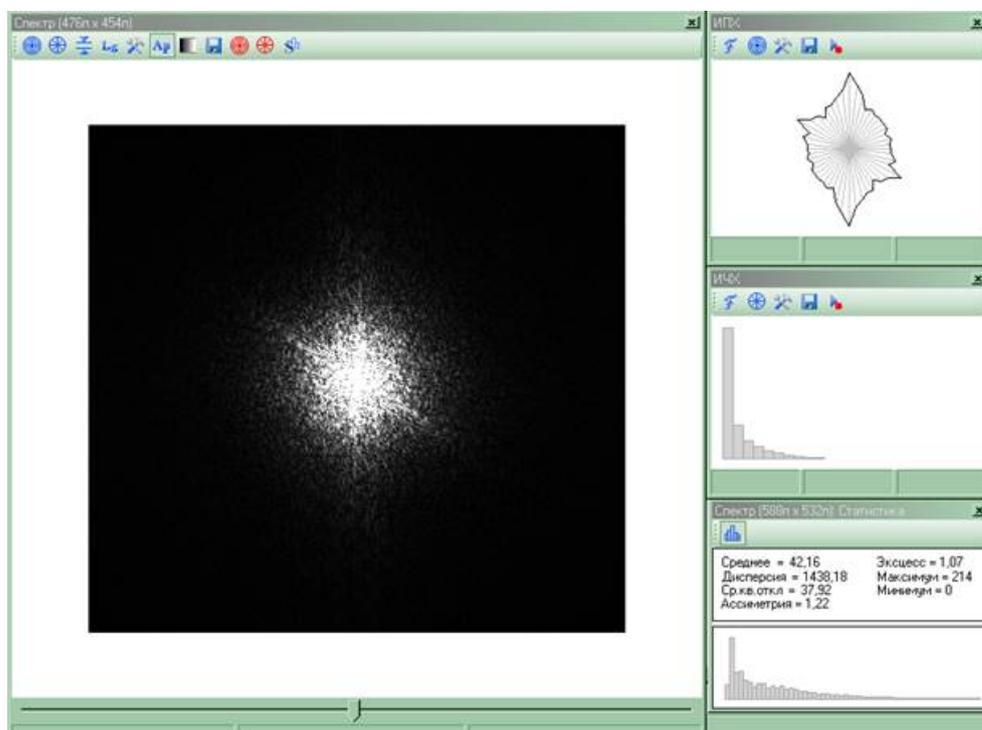


Рис. 19-б

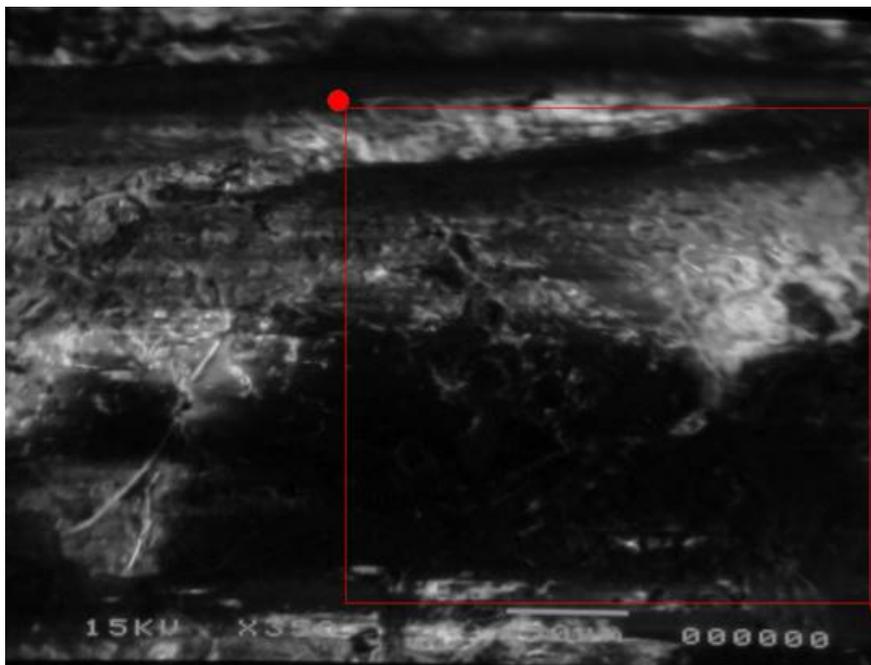


Рис. 20-а

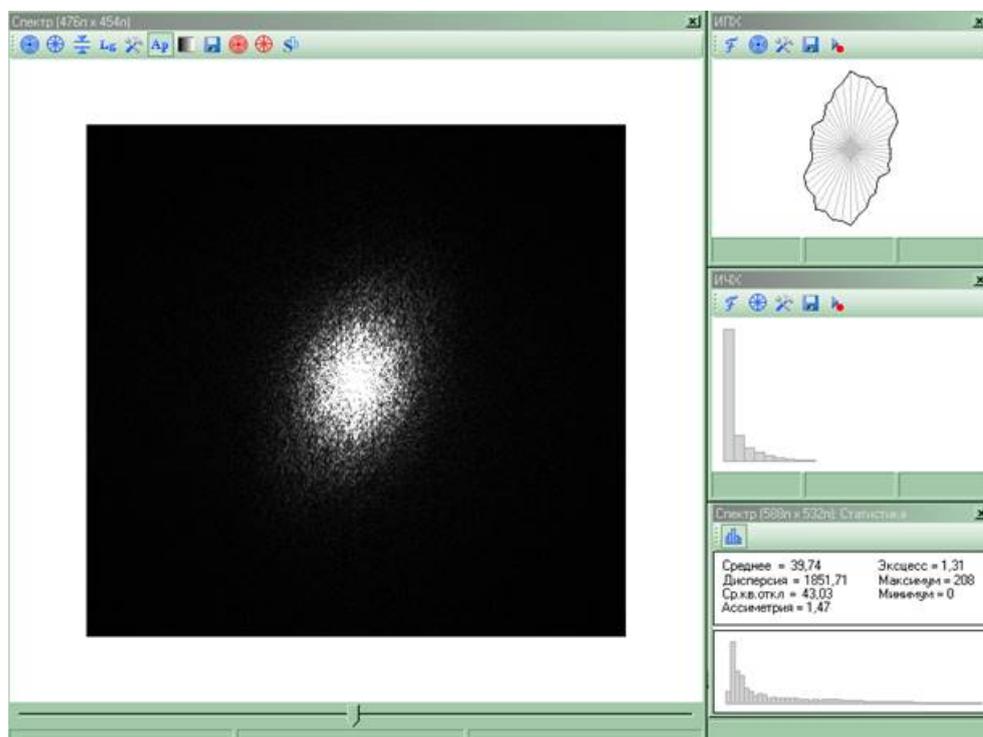


Рис. 20-б

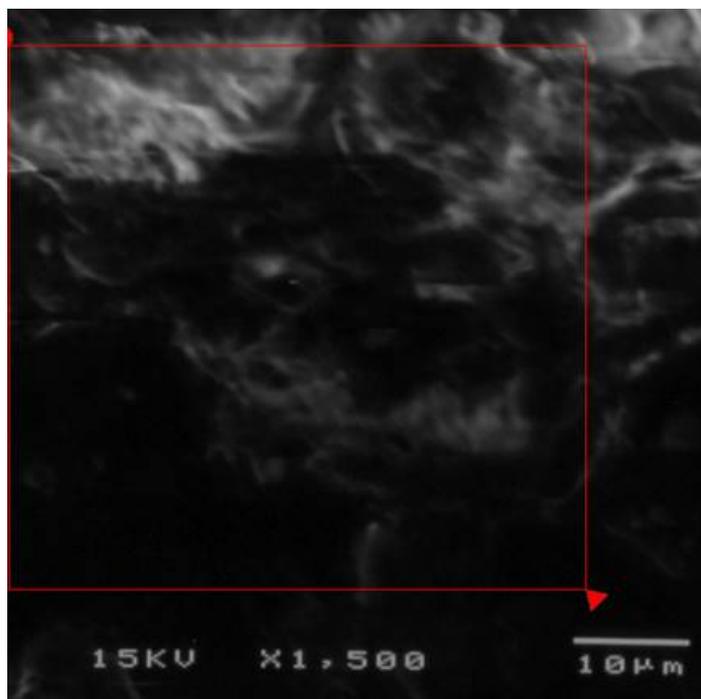


Рис. 21-а

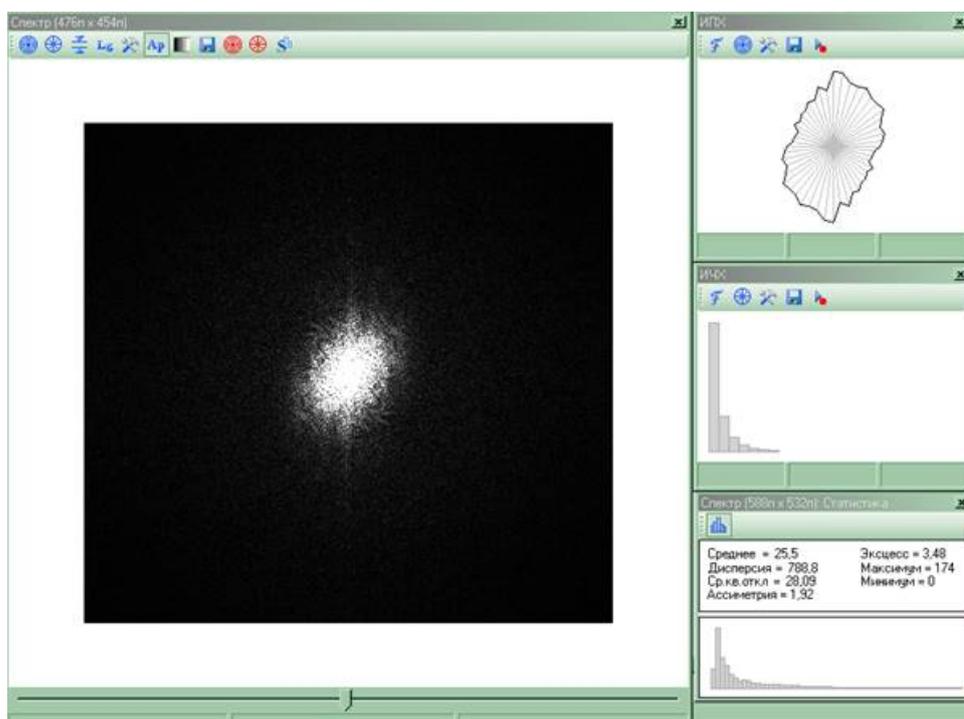


Рис. 21-б

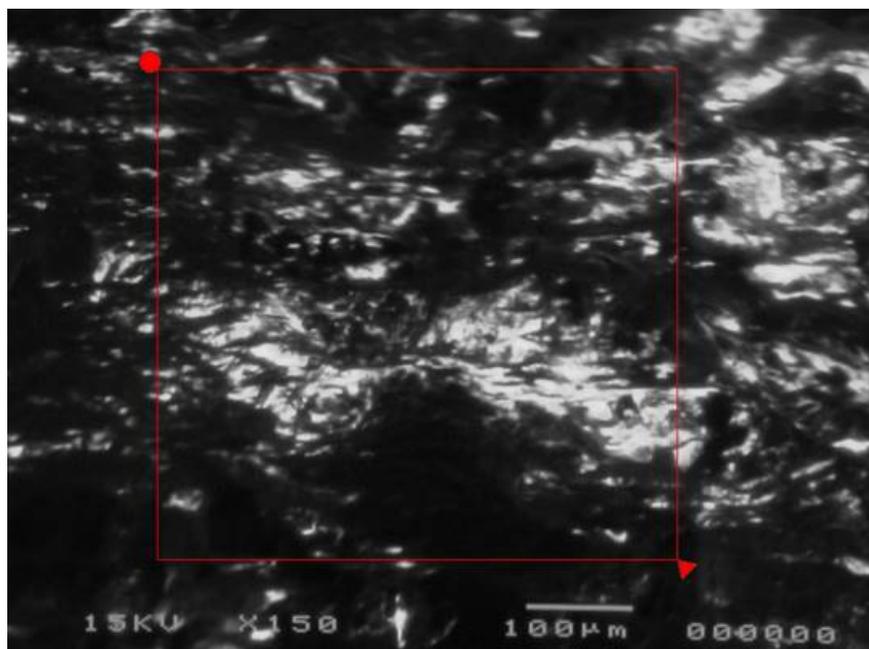


Рис. 22-а

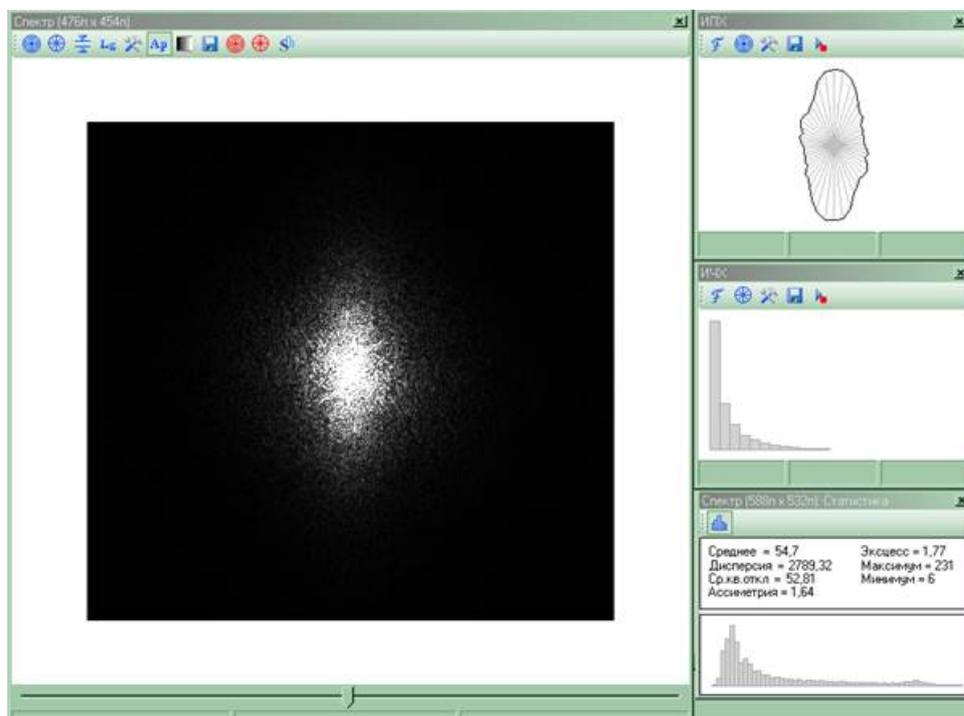


Рис. 22-б

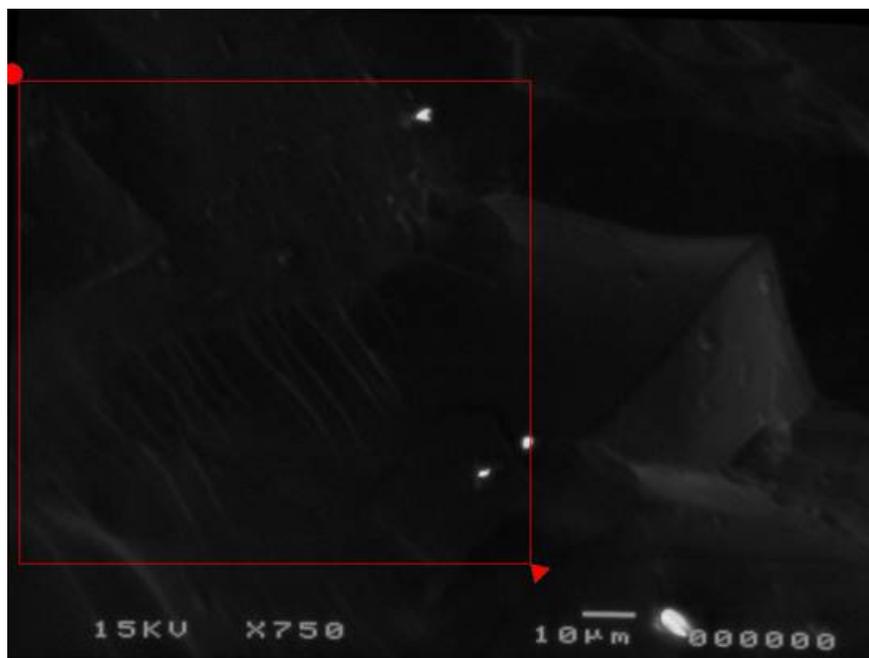


Рис. 23-а

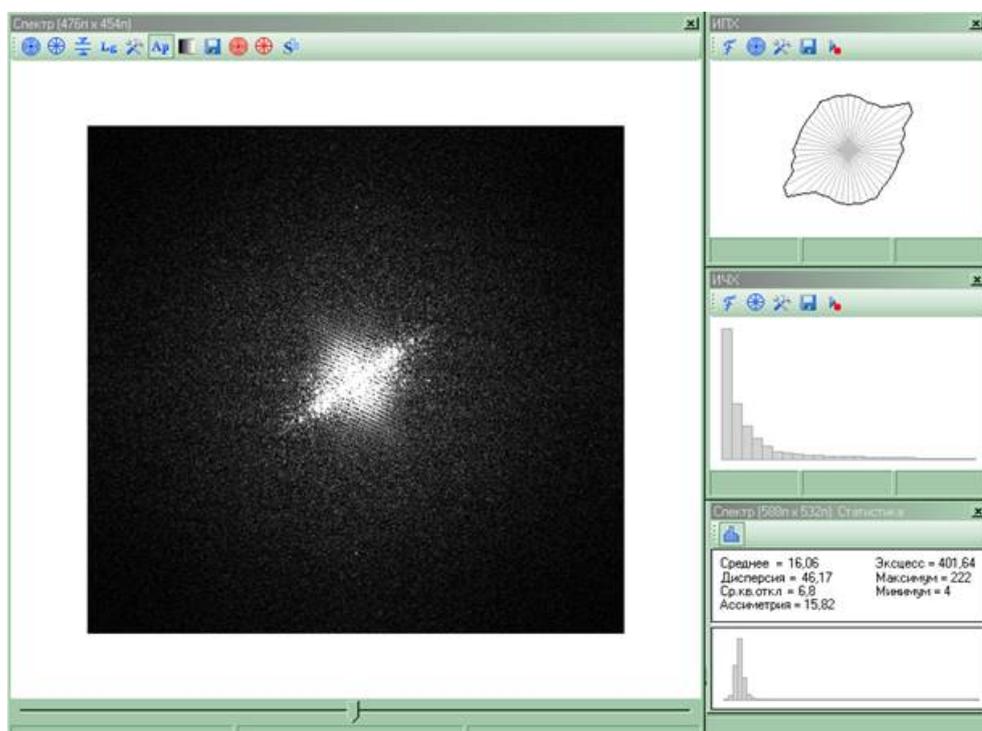


Рис. 23-б

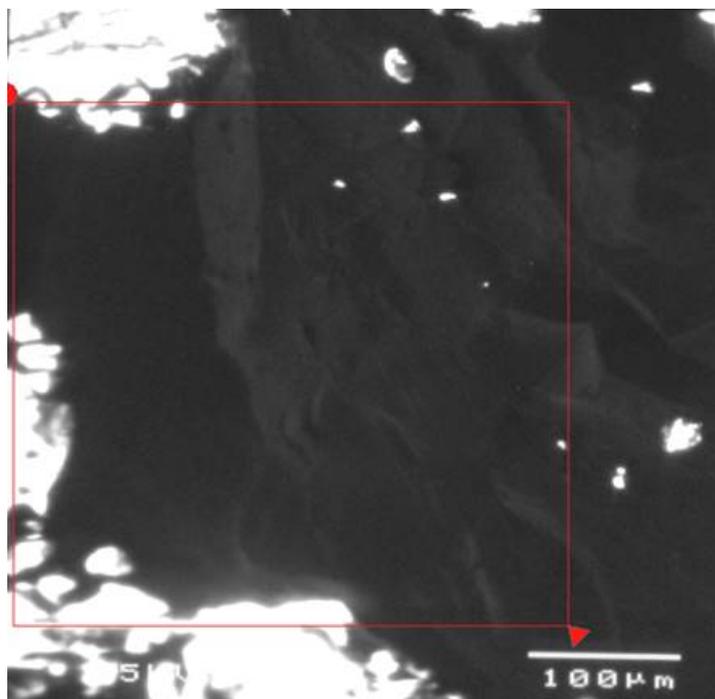


Рис. 24-а

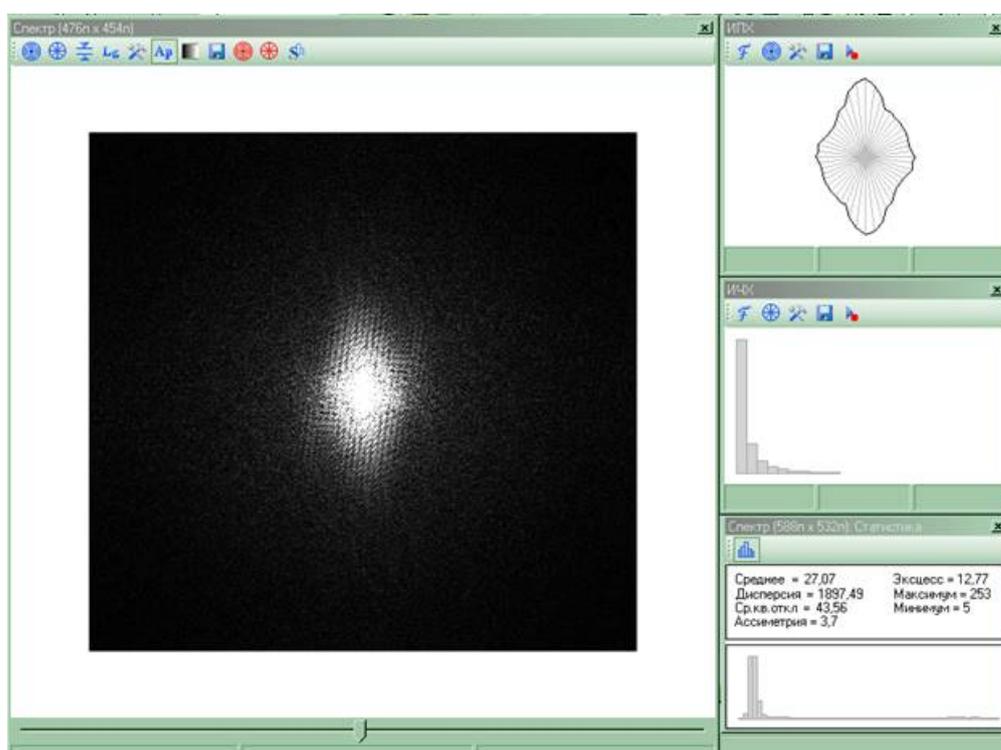


Рис. 24-б

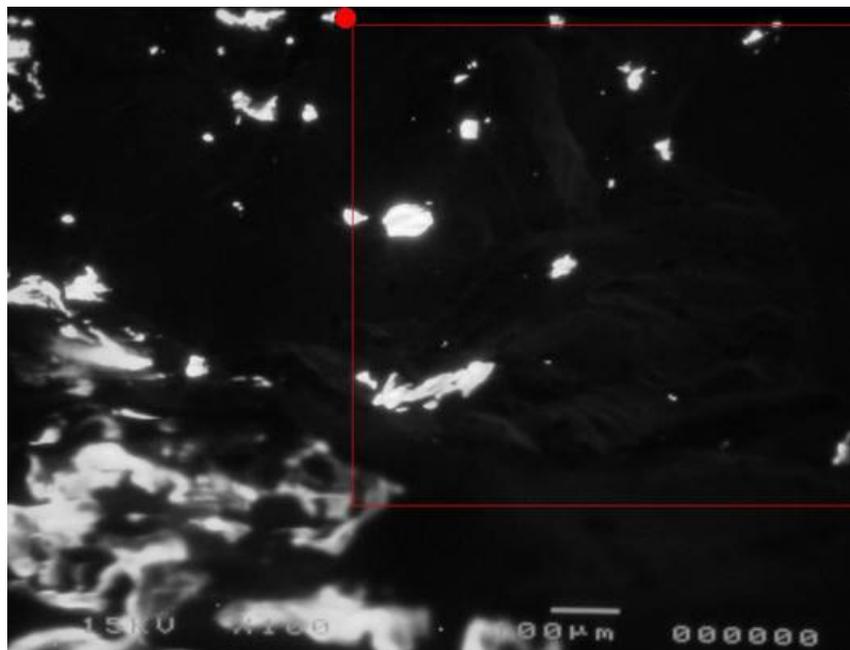


Рис. 25-а

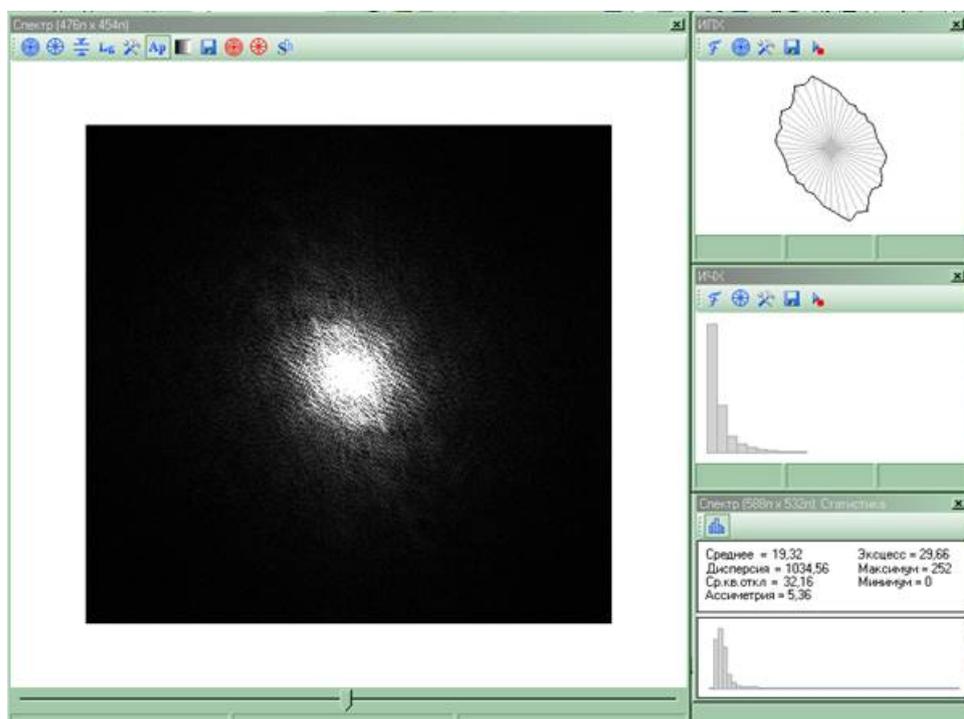


Рис. 25-б

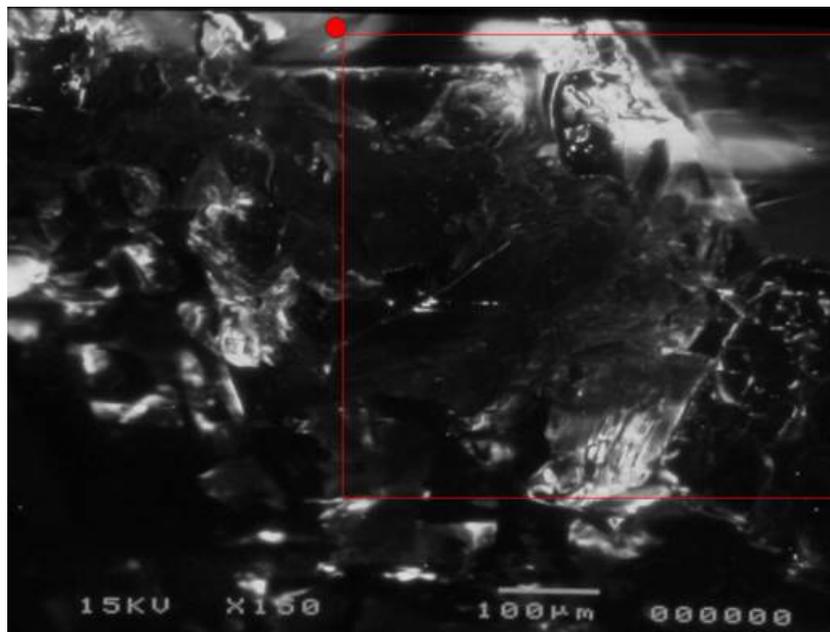


Рис. 26-а

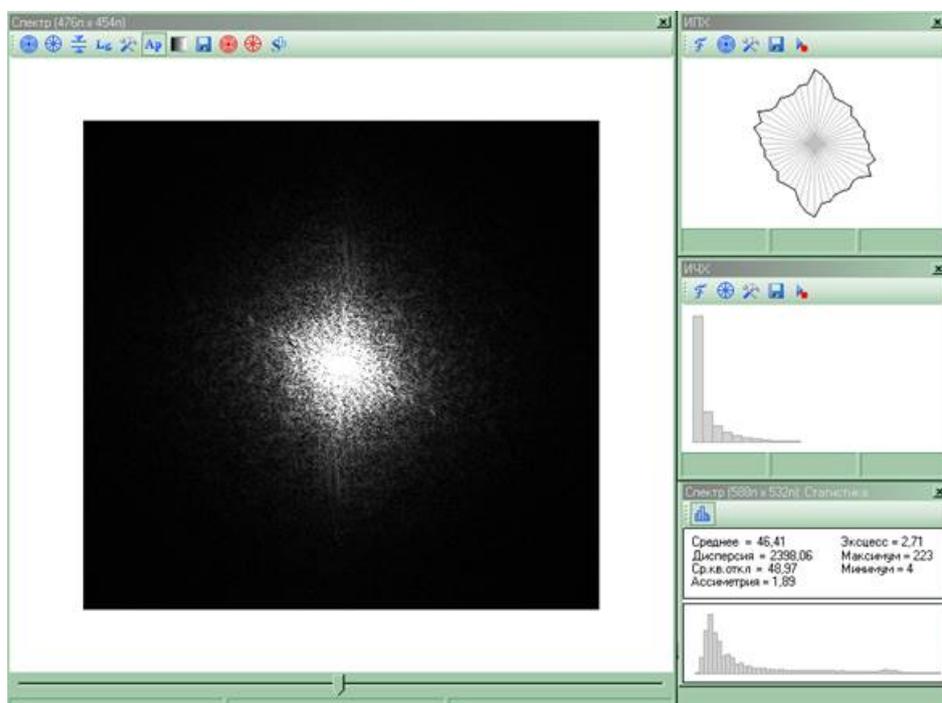


Рис. 26-б

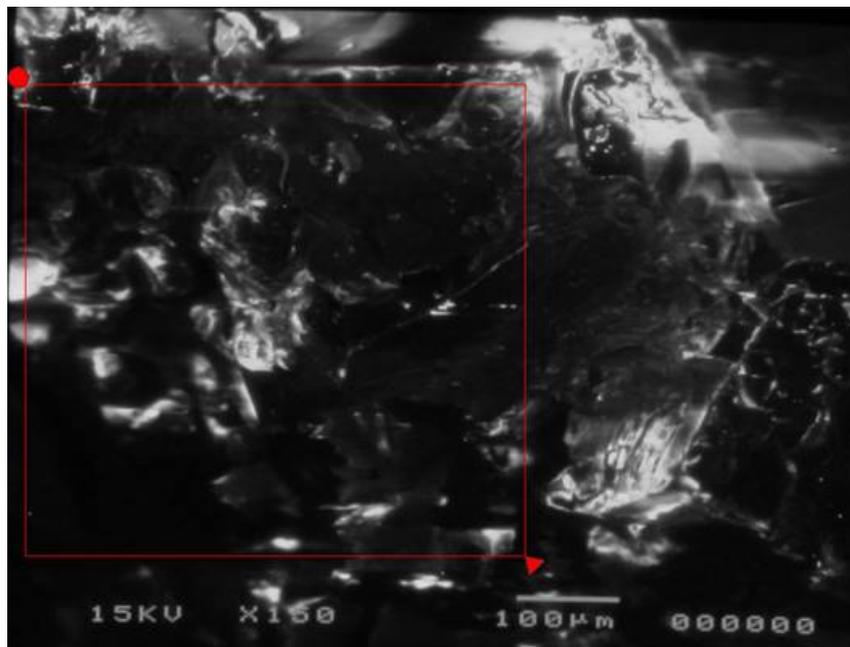


Рис. 27-а

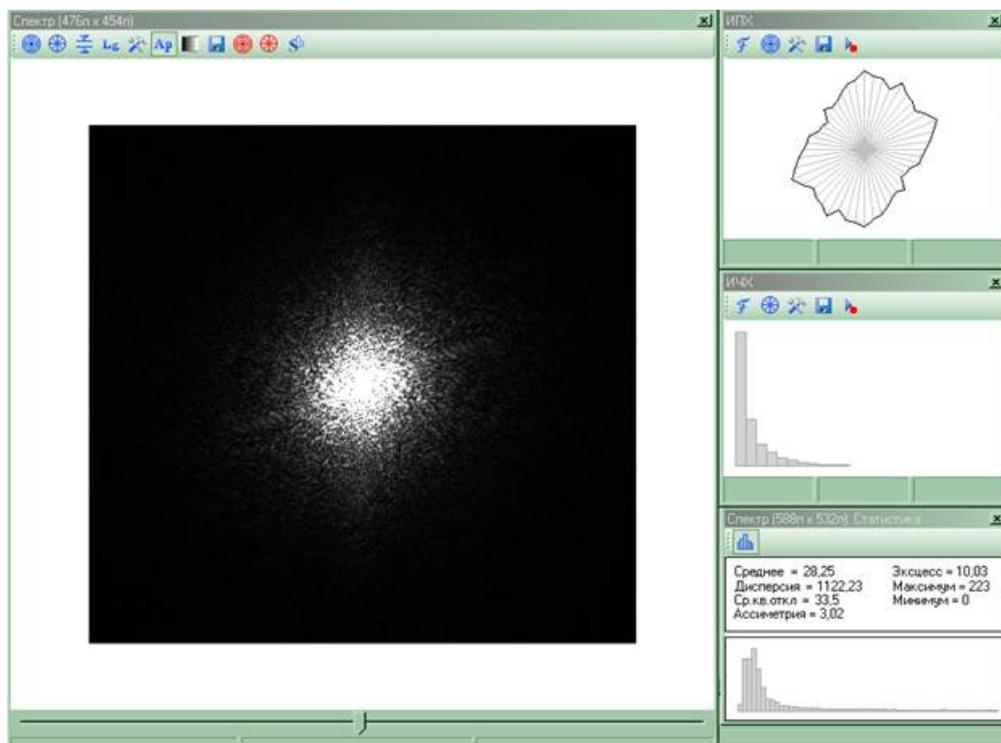


Рис. 27-б

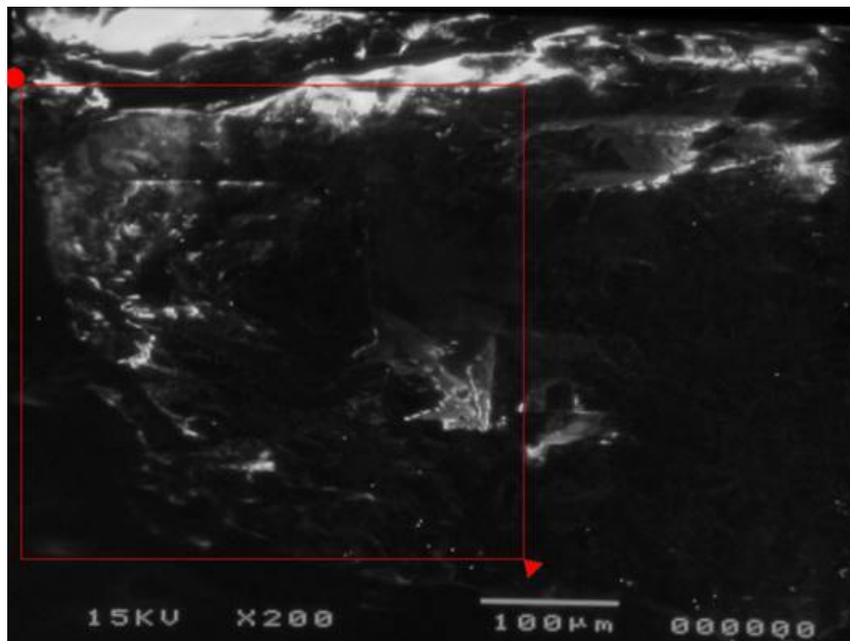


Рис. 28-а

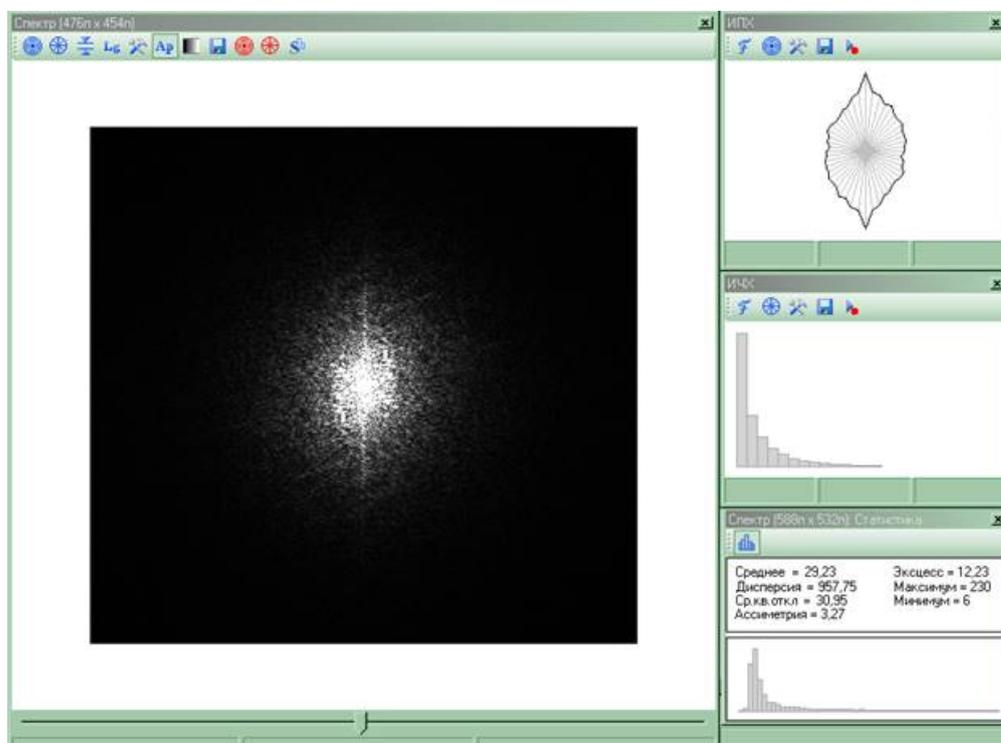


Рис. 28-б

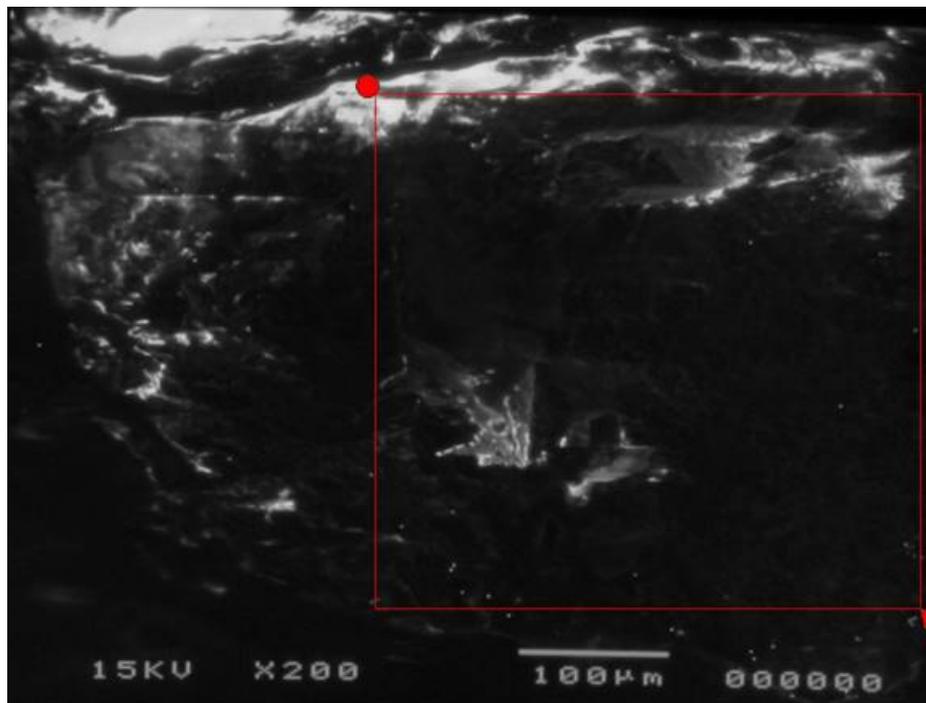


Рис. 29-а

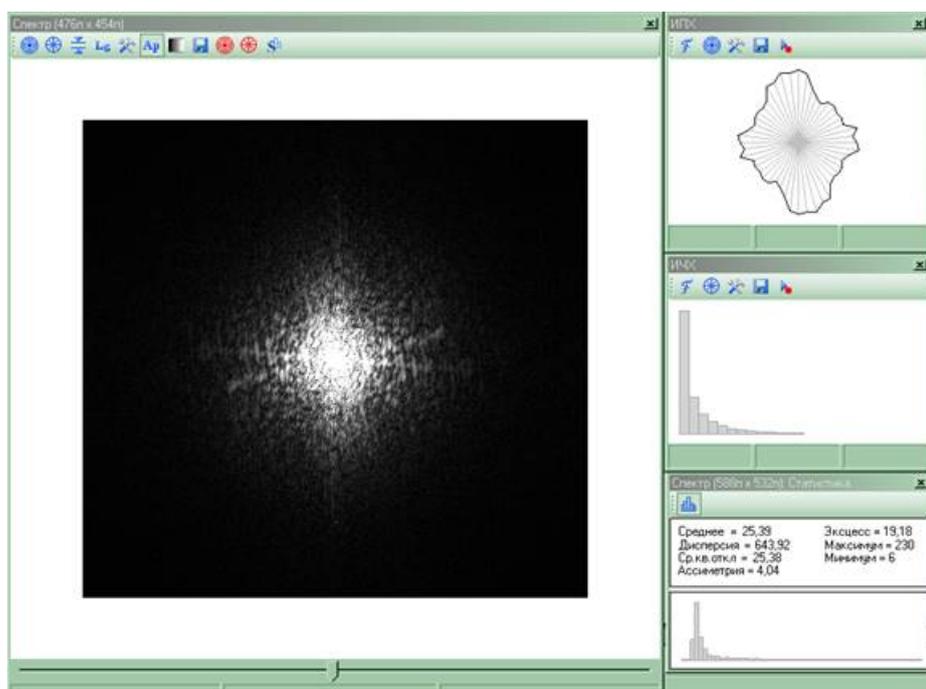


Рис. 29-б

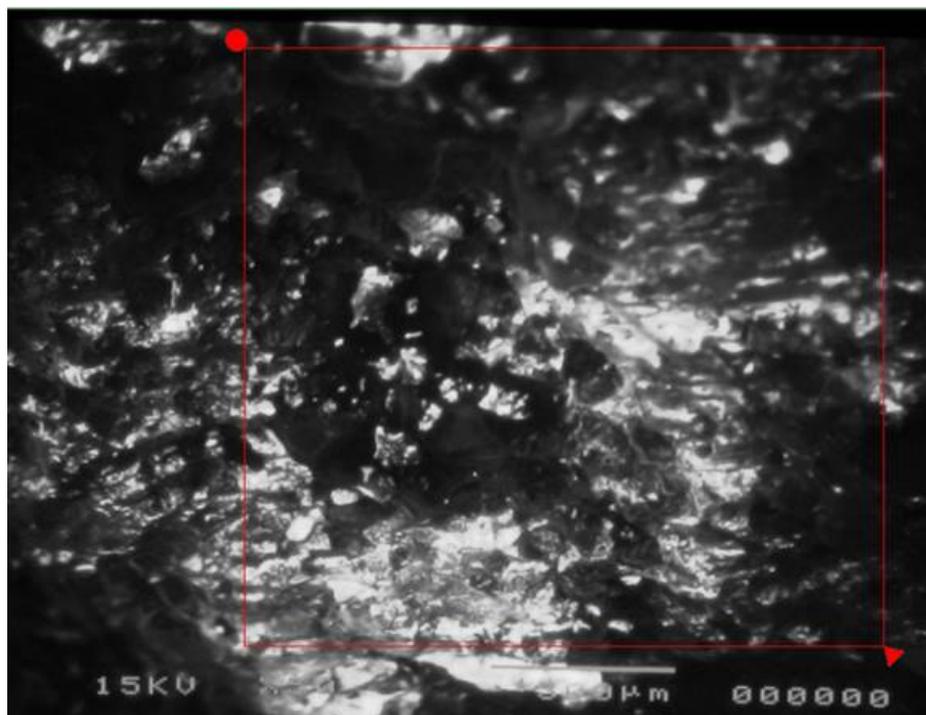


Рис. 30-а

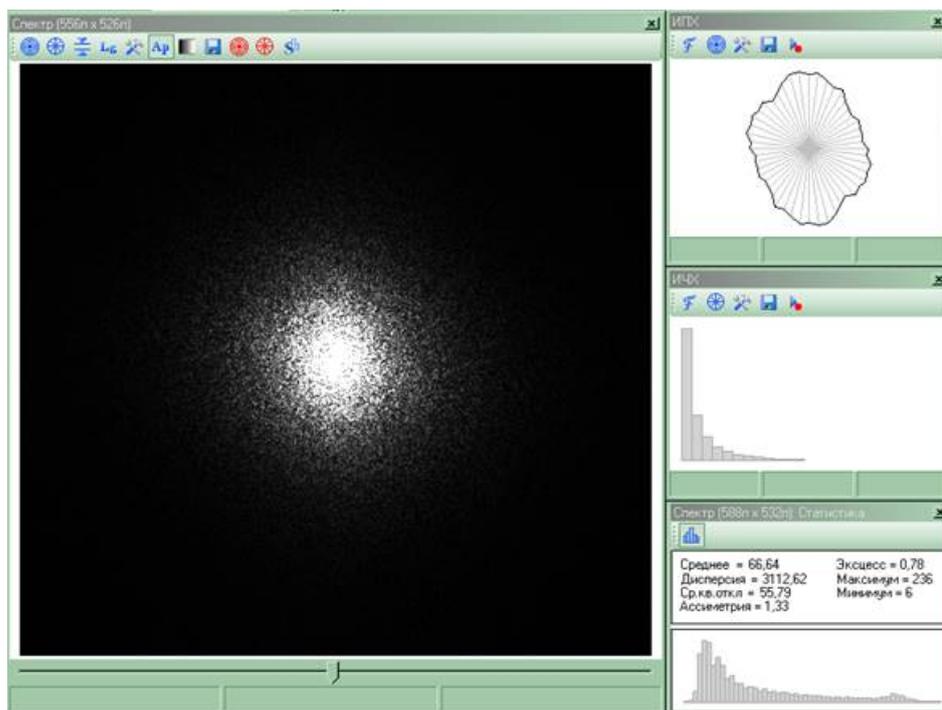


Рис. 30-б

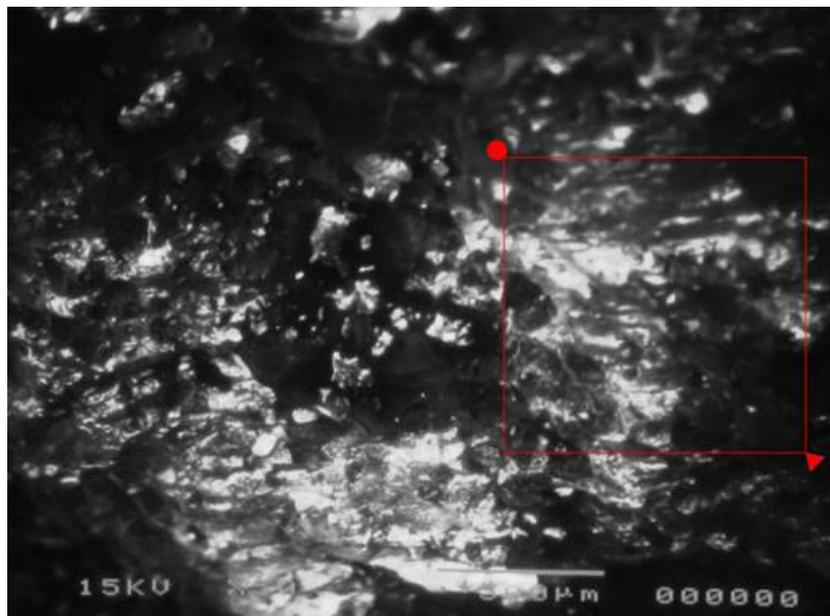


Рис. 31-а

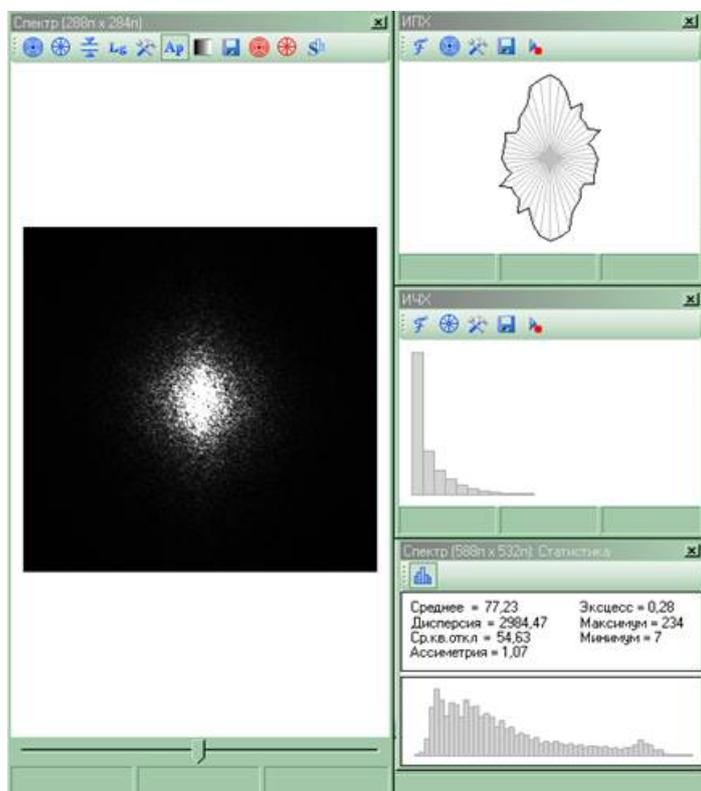


Рис. 31-б

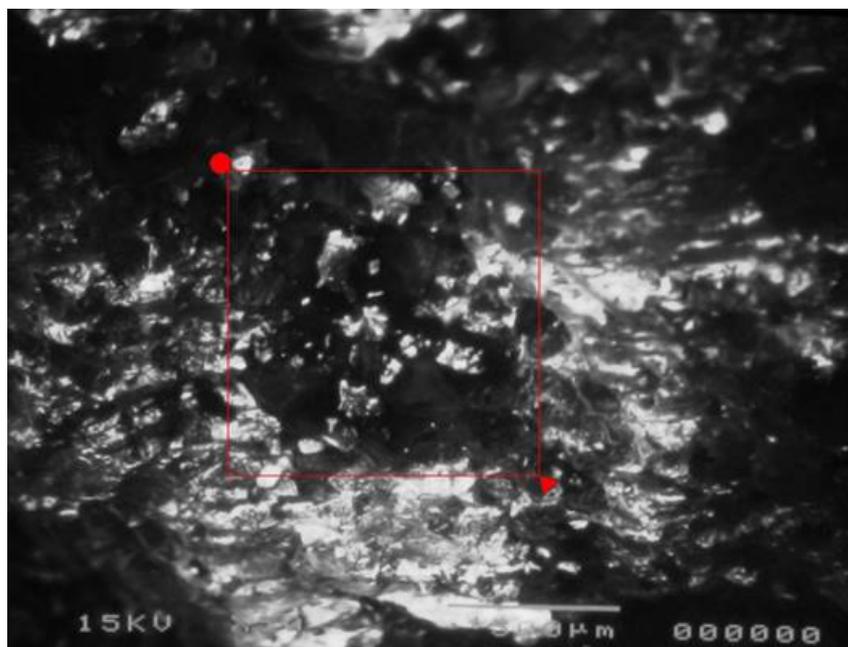


Рис. 32-а

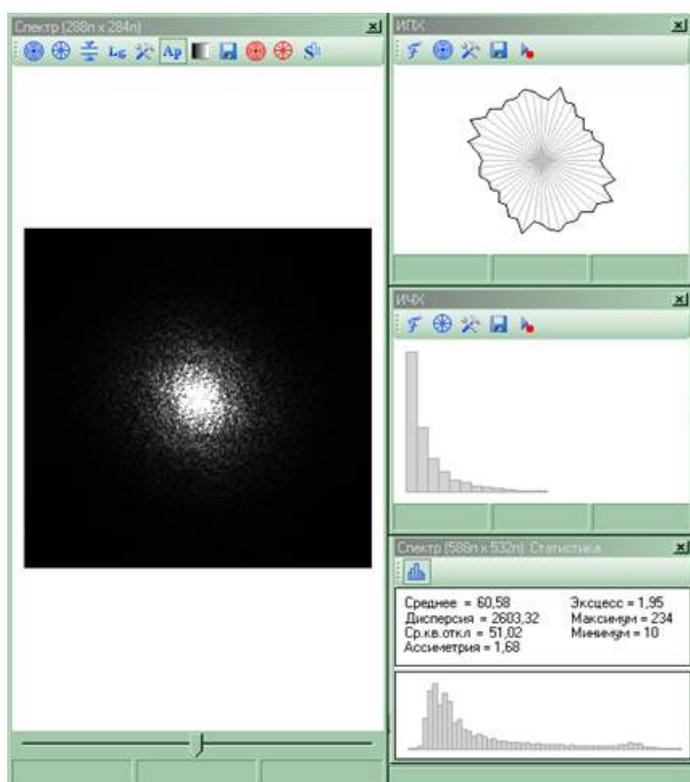


Рис. 32-б.

Выводы

Таким образом, показано, что корреляционно-спектральный анализ может служить в работе с пустынными и релевантными им минералами не только для аддитивного анализа минералов в случае использования методов сканирующей микроскопии, но и для отличия ультраструктур / субмикроструктур данных пустынных образований.

Благодарности

Экспериментальные измерения выполнены на базе инициативного Центра Коллективного Пользования по Мультипараметрической Микроскопии ИХФ РАН и ИБХФ РАН.

Литература

- 1) Астапова О. Р. 2008. 03. 045. Венгроу Д. Археология раннего Египта: социальные изменения в северо-восточной Африке, 10000-2650 гг. До НЭ Wengrow D. The Archaeology of early Egypt: social transformations in North-East Africa, 10000 to 2650 BC.- Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006.-XXI, 343 P.-(Cambridge world Archaeology) // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Серия 5: История. Реферативный журнал. 2008. №3.
- 2) Бембеева Т. Б., Горяева Г. С., Сангаджиев М. М. Минералы пустынь Прикаспия // Природно-ресурсный потенциал Прикаспия и сопредельных территорий: проблемы его рационального использования: материалы II региональной студенческой научно-практической конференции 24–25 апреля 2015 г. Directmedia, 2015.
- 3) Боищенко А. Ф. Эоловые пески Долины озёр (МНР) // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1979. №. 49.
- 4) Гхонеим М.М., Давуд М.Д., Махмуд М.А. Геохимия и спектрометрия мусковитовых гранитов в районе Умм-Салатит, центрально-восточная пустыня, Египет // Естественные и технические науки. 2018. №1(115).
- 5) Гхонеим М. М., Панова Е. Г. Подвижные формы химических элементов интрузивных пород Восточной Пустыни Египта (область Эль Села) // Записки Горного института. 2018. Т. 234.
- 6) Дубинин Е. П., Березнер О. С., Белая Н. И., Скрипко К. А., Семенова Л. Д. Филаретова А. Н. Экспозиционный комплекс зала " горные породы" музея землеведения МГУ // Жизнь Земли. 2012. Т. 34.
- 7) Ефремов Ю. В. О географии Западного Тибета //Известия Русского географического общества. 2007. Т. 139. №. 2.
- 8) Коржнев В. Н. Условия формирования рифей-палеозойских вулканогенно-осадочных формаций Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. №. 3.
- 9) Кулешов В. Н. Месторождение-супергигант Марганцеворудное Поле Калахари (Северный Кейп, ЮАР): геохимия изотопов (13 и 18) и генезис // Литология и полезные ископаемые. 2012. №. 3.
- 10) Лебедев М.А. Развитие контактов древнеегипетской цивилизации с окружающими областями в эпоху Древнего и Среднего царств [Слуги фараона вдали от Нила]. СПб.: Нестор-История, 2015.
- 11) Махмуд Г. М., Абдель Г. А. Э. С. Урановая минерализация жильного типа в Восточной пустыне Египта // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. №. 1. № 49.
- 12) Махмуд А., Дьяконов В.В., Махер Д., Котельников А.Е. Минеральный состав, текстура и формы золотой минерализации Хамама (центральная часть Восточной Пустыни Египта) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. №. 4.
- 13) Рамазанов В.Г., Мохаммед А. Геохимические исследования донных осадков по золоту и сопутствующим элементам в Вади Хаймур, Юго-Восточной Пустыни Египта // Вакі

Universitetinin Xəbərləri. 2011. №1.

14) Сидоренко А. В. Эоловая дифференциация вещества в пустыне / А. В. Сидоренко // Изд-во АН СССР. Серия : География. 1956. № 3.

15) Сиротин В.И., Ненахов В.М., Золотарева Г.С., Буравлева Е.Н., Бондаренко С.В. Белявцева Е.Е. Некоторые проблемы титано-циркониевых россыпей воронежской антеклизы в контексте их связи с типами литогенеза и мегапровинциями земли // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. №2.

16) Сурков А.В., Безлепкин Б.М., Кац Ю.Ж., Коротаева Н.Н., Беловицкая Г.И. Обнаружение микроалмазов и минералов-спутников в каньоне Махтеш Рамон (пустыня Негев, Израиль). Доклады Академии наук. 2006. Т. 407. №1

17) Чирвинский, П.Н. Геометро-химический анализ. Л.: ОНТИ. Химтеорет, 1937.

18) Bekir R. K., Niazy E. A. Magnetite ore mineralization of Um Gheig area, Eastern Desert, Egypt // Egyptian Mineralogist. 1997. Т. 9.

19) Descamps E.C., Monteil C.L., Menguy N., Ginet N., Pignol D., Bazylinski D.A., Lefevre C.T. Desulfamplus magnetovallimortis gen. nov., sp. nov., a magnetotactic bacterium from a brackish desert spring able to biomineralize greigite and magnetite, that represents a novel lineage in the Desulfobacteraceae // Systematic and applied microbiology. 2017. Т. 40. №. 5.

20) Elhaddad M. A. The first occurrence of platinum group minerals (PGM) in a chromite deposit in the Eastern Desert, Egypt // Mineralium Deposita. 1996. Т. 31. №. 5.

21) El-Taher A. Determination of chromium and trace elements in El-Rubshi chromite from Eastern Desert, Egypt by neutron activation analysis // Applied radiation and isotopes. 2010. Т. 68. №. 9.

22) Emile Z. Petrological, mineralogical and geochemical studies on the magnetite-ilmenite-apatite ore (nelsonite) from Kolmnab, South Eastern Desert, UAR // Proceedings of the Egyptian Academy of Sciences. 1969. Т. 22.

23) Hunt G. R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared // Geophysics. 1977. Т. 42. №. 3. С. 501-513.

24) Khaleal F. M., Kamar M. S. Geology and Radioactivity of peraluminous Granite and Associated Pegmatite Hosting Magnetite Mineralization at Um Regeba Area, Southeastern Desert, Egypt // Nuclear Sciences Scientific Journal. 2016. Т. 5.

25) Khalil K. I. Chromite mineralization in ultramafic rocks of the Wadi Ghadir area, Eastern Desert, Egypt: mineralogical, microchemical and genetic studies // Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry. 2007. Т. 183. №. 3.

26) Khalil A. E., El-Desoky H. M., Salem S. M. Contribution of remote sensing techniques to the recognition of titanite occurrences at Gabal El-Degheimi area, Central Eastern Desert, Egypt // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2017. Т. 20. №. 1.

27) Khudeir A. A., El Haddad M. A., Leake B. E. Compositional variation in chromite from the Eastern Desert, Egypt // Mineralogical Magazine. 1992. Т. 56. №. 385.

28) Klüser L., Kleiber P., Holzer-Popp T., Grassian V. H. Desert dust observation from space—Application of measured mineral component infrared extinction spectra //

Atmospheric environment. 2012. Т. 54.

29) Mancinelli R.L., Bishop J.L. Magnetite in desert varnish and applications to rock varnish on Mars // Lunar and Planetary Science Conference. 2002. Т. 33.

30) Refai E., Wassif N. A., Shoaib A. Stability of remanence and paleomagnetic studies of some chromite ores from Barramiya and Allawi occurrences, Eastern Desert, Egypt // Earth and Planetary Science Letters. 1989. Т. 94. №. 1-2.

31) Saleh G. M. The chromite deposits associated with ophiolite complexes, southeastern Desert, Egypt: Petrological and geochemical characteristics and mineralization // Chinese Journal of Geochemistry. 2006. Т. 25. №. 4.

32) Smith A. J. A., Grainger R. G. Does variation in mineral composition alter the short-wave light scattering properties of desert dust aerosol? // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2014. Т. 133.

33) Youssef M. A. S., Elkhodary S. T. Utilization of airborne gamma ray spectrometric data for geological mapping, radioactive mineral exploration and environmental monitoring of southeastern Aswan city, South Eastern Desert, Egypt // Geophysical Journal International. 2013. Т. 195. №. 3.

34) Vane G., Goetz A. F. H. Terrestrial imaging spectrometry: current status, future trends // Remote Sensing of Environment. 1993. Т. 44. №. 2-3.

35) Wald A. E., Kaufman Y.J., Tanré D., Gao B. C. Daytime and nighttime detection of mineral dust over desert using infrared spectral contrast // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1998. Т. 103. №. D24.

Библиография

1. Астапова О. Р. 2008. 03. 045. Венгров Д. Археология раннего Египта: социальные изменения в северо-восточной Африке, 10000-2650 гг. До НЭ Wengrow D. The Archaeology of early Egypt: social transformations in North-East Africa, 10000 to 2650 BC.-Cambridge: Cambridge Univ.. Press, 2006.-XXI, 343 P.-(Cambridge world Archaeology) // Социальные и гуманитарные науки. Отечественная и зарубежная литература. Серия 5: История. Реферативный журнал. 2008. №3.
2. Бембеева Т. Б., Горяева Г. С., Сангаджиев М. М. Минералы пустынь Прикаспия // Природно-ресурсный потенциал Прикаспия и сопредельных территорий: проблемы его рационального использования: материалы II региональной студенческой научно-практической конференции 24–25 апреля 2015 г. Directmedia, 2015.
3. Боищенко А. Ф. Эоловые пески Долины озёр (МНР) // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 1979. №. 49.
4. Гхонеим М.М., Давуд М.Д., Махмуд М.А. Геохимия и спектрометрия мусковитовых гранитов в районе Умм-Салатит, центрально-восточная пустыня, Египет // Естественные и технические науки. 2018. №1(115).
5. Гхонеим М. М., Панова Е. Г. Подвижные формы химических элементов интрузивных пород Восточной Пустыни Египта (область Эль Села) // Записки Горного института. 2018. Т. 234.
6. Дубинин Е. П., Березнер О. С., Белая Н. И., Скрипка К. А., Семенова Л. Д., Филаретова А. Н. Экспозиционный комплекс зала " горные породы" музея землеведения МГУ // Жизнь Земли. 2012. Т. 34.

7. Ефремов Ю. В. О географии Западного Тибета // Известия Русского географического общества. 2007. Т. 139. №. 2.
8. Коржнев В. Н. Условия формирования рифей-палеозойских вулканогенно-осадочных формаций Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. №. 3.
9. Кулешов В. Н. Месторождение-супергигант Марганцеворудное Поле Калахари (Северный Кейп, ЮАР): геохимия изотопов (13 и 18) и генезис // Литология и полезные ископаемые. 2012. №. 3.
10. Лебедев М.А. Развитие контактов древнеегипетской цивилизации с окружающими областями в эпоху Древнего и Среднего царств [Слуги фараона вдали от Нила]. СПб.: Нестор-История, 2015.
11. Махмуд Г. М., Абдель Г. А. Э. С. Урановая минерализация жильного типа в Восточной пустыне Египта // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. №. 1. № 49.
12. Махмуд А., Дьяконов В.В., Махер Д., Котельников А.Е. Минеральный состав, текстура и формы золотой минерализации Хамама (центральная часть Восточной Пустыни Египта) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. №. 4.
13. Рамазанов В.Г., Мохаммед А. Геохимические исследования донных осадков по золоту и сопутствующим элементам в Вади Хаймур, Юго-Восточной Пустыни Египта // Baki Universitetinin Xəbərleri. 2011. №1.
14. Сидоренко А. В. Эоловая дифференциация вещества в пустыне / А. В. Сидоренко // Изд-во АН СССР. Серия : География. 1956. № 3.
15. Сиротин В.И., Ненахов В.М., Золотарева Г.С., Буравлева Е.Н., Бондаренко С.В., Белявцева Е.Е. Некоторые проблемы титано-циркониевых россыпей воронежской антеклизы в контексте их связи с типами литогенеза и мегапровинциями земли // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. №2.
16. Сурков А.В., Безлепкин Б.М., Кац Ю.Ж., Коротаева Н.Н., Беловицкая Г.И. Обнаружение микроалмазов и минералов-спутников в каньоне Махтеш Рамон (пустыня Негев, Израиль). Доклады Академии наук. 2006. Т. 407. №1
17. Чирвинский, П.Н. Геометро-химический анализ. Л.: ОНТИ. Химтеорет, 1937.
18. Bekir R. K., Niazy E. A. Magnetite ore mineralization of Um Gheig area, Eastern Desert, Egypt // Egyptian Mineralogist. 1997. Т. 9.
19. Descamps E.C., Monteil C.L., Menguy N., Ginet N., Pignol D., Bazyliniski D.A., Lefevre C.T. Desulfamplus magnetovallimortis gen. nov., sp. nov., a magnetotactic bacterium from a brackish desert spring able to biomineralize greigite and magnetite, that represents a novel lineage in the Desulfobacteraceae // Systematic and applied microbiology. 2017. Т. 40. №. 5.
20. Elhaddad M. A. The first occurrence of platinum group minerals (PGM) in a chromite deposit in the Eastern Desert, Egypt // Mineralium Deposita. 1996. Т. 31. №. 5.
21. El-TaHER A. Determination of chromium and trace elements in El-Rubshi chromite from Eastern Desert, Egypt by neutron activation analysis // Applied radiation and isotopes. 2010. Т. 68. №. 9.
22. Emile Z. Petrological, mineralogical and geochemical studies on the magnetite-ilmenite-apatite ore (nelsonite) from Kolmnab, South Eastern Desert, UAR // Proceedings of the Egyptian Academy of Sciences. 1969. Т. 22.
23. Hunt G. R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared // Geophysics. 1977. Т. 42. №. 3. С. 501-513.

24. Khaleal F. M., Kamar M. S. Geology and Radioactivity of peraluminous Granite and Associated Pegmatite Hosting Magnetite Mineralization at Um Regeba Area, Southeastern Desert, Egypt // Nuclear Sciences Scientific Journal. 2016. T. 5.
25. Khalil K. I. Chromite mineralization in ultramafic rocks of the Wadi Ghadir area, Eastern Desert, Egypt: mineralogical, microchemical and genetic studies // Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry. 2007. T. 183. №. 3.
26. Khalil A. E., El-Desoky H. M., Salem S. M. Contribution of remote sensing techniques to the recognition of titanite occurrences at Gabal El-Degheimi area, Central Eastern Desert, Egypt // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2017. T. 20. №. 1.
27. Khudeir A. A., El Haddad M. A., Leake B. E. Compositional variation in chromite from the Eastern Desert, Egypt // Mineralogical Magazine. 1992. T. 56. №. 385.
28. Klüser L., Kleiber P., Holzer-Popp T., Grassian V. H. Desert dust observation from space—Application of measured mineral component infrared extinction spectra // Atmospheric environment. 2012. T. 54.
29. Mancinelli R.L., Bishop J.L. Magnetite in desert varnish and applications to rock varnish on Mars // Lunar and Planetary Science Conference. 2002. T. 33.
30. Refai E., Wassif N. A., Shoaib A. Stability of remanence and paleomagnetic studies of some chromite ores from Barramiya and Allawi occurrences, Eastern Desert, Egypt // Earth and Planetary Science Letters. 1989. T. 94. №. 1-2.
31. Saleh G. M. The chromite deposits associated with ophiolite complexes, southeastern Desert, Egypt: Petrological and geochemical characteristics and mineralization // Chinese Journal of Geochemistry. 2006. T. 25. №. 4.
32. Smith A. J. A., Grainger R. G. Does variation in mineral composition alter the short-wave light scattering properties of desert dust aerosol? // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2014. T. 133.
33. Youssef M. A. S., Elkhodary S. T. Utilization of airborne gamma ray spectrometric data for geological mapping, radioactive mineral exploration and environmental monitoring of southeastern Aswan city, South Eastern Desert, Egypt // Geophysical Journal International. 2013. T. 195. №. 3.
34. Vane G., Goetz A. F. H. Terrestrial imaging spectrometry: current status, future trends // Remote Sensing of Environment. 1993. T. 44. №. 2-3.
35. Wald A. E., Kaufman Y.J., Tanré D., Gao B. C. Daytime and nighttime detection of mineral dust over desert using infrared spectral contrast // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1998. T. 103. №. D24.