

## КОМПЛЕКСНОЕ СТРУКТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЦЫ ЛУННОГО РЕГОЛИТА МЕТОДОМ МУЛЬТИМАСШТАБНОЙ И МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ОБЪЕМНОЙ МИКРОСКОПИИ

© 2020 г. В. Я. Шкловер<sup>а</sup>, Е. Н. Слюта<sup>б, \*</sup>, В. П. Загвоздин<sup>а</sup>, Т. Г. Дмитриева<sup>а</sup>, П. Р. Казанский<sup>а</sup>,  
А. Ю. Рашковский<sup>а</sup>, И. Г. Маряев<sup>а, \*\*</sup>, Е. М. Сорокин<sup>б</sup>

<sup>а</sup>ООО “Системы для микроскопии и анализа” (СМА)  
Сколковское шоссе, 45/20, Москва, 121353 Россия

<sup>б</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук  
ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: slyuta@geokhi.ru

\*\*e-mail: maryasev@microscop.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 08.05.2020 г.

Применен методический подход, который позволил провести комплексное мультимасштабное исследование образца частицы лунного грунта при минимальном воздействии на его структуру. Получена качественная и количественная информация о структуре и составе образца в диапазоне масштабов от сотен микрометров до десятков нанометров. Предлагаемый корреляционный подход позволяет проводить высокоточные исследования структуры и состава любых твердых образцов в условиях ограниченного количества материала для анализа. Кроме того, открывается возможность накопления и сохранения цифровых образов ценных объектов (в том числе деградирующих в земных условиях) для дальнейшего использования исследователями всего мира.

**Ключевые слова:** лунные минералы, реголит, рентгеновская микротомография, растровая электронная микроскопия, аналитическая трансмиссионная электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ.

DOI: 10.31857/S0044450220100138

Исследование и освоение Луны как геологического объекта, аналогичного Земле и другим планетным и малым телам Солнечной системы, является главной задачей лунной программы на современном этапе, в которой на первом месте стоит всесторонний анализ лунного вещества. К приоритетным научным направлениям относятся также изучение происхождения и динамической истории системы Земля–Луна, степени дифференциации и внутреннего строения Луны, истории становления ранней коры на Луне, глобальной дихотомии и региональной латеральной неоднородности состава лунной коры и мантии, истории лунного магматизма и вулканизма, изменения интенсивности вулканической активности и состава морских пород Луны во времени и в пространстве, лунной хронологии, происхождения древнего лунного магнитного поля и природы гравитационных аномалий (масконов), присутствия в реголите редкого астероидного и кометного вещества, присутствия в реголите реликтового вещества молодой Земли со следами

ранней биологической активности или еще без нее, изменения активности и состава солнечного ветра и галактических космических лучей за период 4 млрд лет и более, изменения состава земного ветра, имплантированного в частицы лунного реголита с момента образования первичной атмосферы на ранней Земле и др. К практическим задачам освоения Луны относятся концентрация и распределение лунных ресурсов, разработка и создание технических средств для добычи и обогащения полезных компонентов, создание лунных транспортных средств и строительство лунных объектов. Решение всех перечисленных задач тесным образом связано с изучением состава и свойств лунного вещества [1].

Доставка образцов лунных пород на Землю является необходимым и ключевым элементом исследования Луны. Только в лабораторных условиях возможно детальное исследование текстуры, структуры и микроструктуры пород и минералов, определение и изучение главных, аксессуарных и редких минералов и включений, анализ элемент-

ного состава, анализ отношений любых стабильных и радиогенных изотопов, определение абсолютного возраста минералов, пород и соответственно геологических структур и сопутствующих их образованию процессов. Эти данные лежат в основе знаний о происхождении, условиях формирования и эволюции локальных и региональных структур, коры и всего планетного тела в целом.

Доставка образцов необходима также в целях использования полученных в земных лабораториях данных для поддержки дистанционных спектральных и геофизических исследований и интерпретации данных, получаемых с разной степенью точности и разрешения с орбитальных и спускаемых на поверхность космических аппаратов.

Крайне важным элементом информативности доставленных образцов является способ и место их отбора. Лунный реголит имеет сложное слоистое строение и собственную стратиграфическую и геохимическую историю, которая может быть прослежена на протяжении нескольких млрд. лет с момента образования подстилающих пород.

Образцы лунного грунта были отобраны и доставлены на Землю из 9 различных районов Луны. Советская автоматическая станция “Луна-16” доставила 101 г лунного грунта из Моря Изобилия [2], станция “Луна-20” – 52 г из материковой области [3], “Луна-24” доставила 170.1 г из Моря Кризисов [4].

Из Моря Спокойствия первая пилотируемая экспедиция на Луну “Аполлон-11” доставила 21.6 кг лунного грунта [5]. С каждой последующей пилотируемой экспедицией количество доставленного лунного грунта увеличивалось: “Аполлон-12” – 34.3 кг из Океана Бурь, “Аполлон-14” – 42.3 кг из района Фра-Мауро, “Аполлон-15” – 77.3 кг из Моря Дождей, “Аполлон-16” – 95.7 кг из материкового района к западу от Плато Канта, и “Аполлон-17” – 110.5 кг из Моря Ясности. Всего пилотируемые экспедиции по программе Аполлон доставили на Землю 381.7 кг образцов лунных пород и реголита [5].

Продолжение изучения образцов лунного грунта связано, прежде всего, с решением описанных выше приоритетных научных задач на современном этапе исследования Луны и появлением новых задач и гипотез. Например, крайне маловероятно, что импактная гипотеза происхождения Луны или теория магматического океана и образования ранней материковой коры на Луне могут быть обоснованы и решены без образцов лунных пород. Развитие научно-исследовательской аппаратуры на новых технологических принципах позволяет исследовать отдельные минералы и частицы реголита с беспрецедентным увеличением, масштабом и детальностью, которые ранее были недоступны.

Основной задачей данной работы является комплексное структурное исследование отдельной частицы лунного реголита методом мультимасштабной и мультимодальной объемной микроскопии. Принципы мультимасштабной объемной микроскопии позволяют разработать и применить системный, в значительной степени стандартизированный комплексный подход к исследованию уникальных субмиллиметровых объектов.

Объемная визуализация исследуемого объекта одновременно в макро-, микро- и субмикронном/нанометровом масштабе позволяет выявить пространственные взаимоотношения структурных элементов исследуемого объекта на разных уровнях детализации, получить полную морфологическую картину и определить для элементов структуры численные значения таких параметров, как объемная доля, объемные распределения формы, размер и пр. Комплексность и мультимасштабность такого подхода обеспечивается применением разных методов структурной характеристики для исследования одного образца/области интереса, в частности, рентгеновской микротомографии (рентгеновской микроскопии), FIB/SEM (растровой электронно-ионной микроскопии), просвечивающей электронной микроскопии, а также программных средств визуализации, реконструкции, количественных расчетов и функционального моделирования.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования выбрали частицу лунного реголита из образца лунного грунта, доставленного с места посадки автоматической станции “Луна-20”. Визуально частица имела темно-серый цвет, стеклянный блеск, неровную неправильную форму с немного овальными краями. Примерный размер частицы составлял  $115 \times 70 \times 50$  мкм и соответствовал медианному значению, полученному при исследовании насыпного образца лунного грунта методом рентгеновской микротомографии в работе [6].

Схему исследования строили таким образом, чтобы сохранить большую часть образца в неизменном состоянии. Для реализации комплексного мультимасштабного анализа структуры и минерального состава исследуемого образца важнейшей задачей было соблюдение принципов корреляционной микроскопии – комплексного подхода к исследованию одного объекта, обычно сочетающего различные виды микроскопии в пределах одной пространственной зоны интереса. Такой подход позволяет получать микро-, нано- и субнаноструктурную информацию в контексте более крупных структурных элементов вплоть до макрообраза исследуемого объекта.

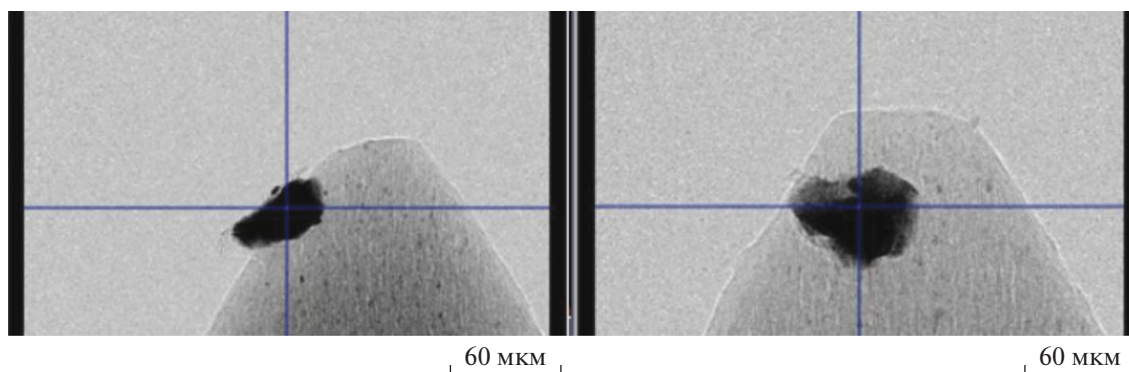


Рис. 1. Фронтальная и боковая рентгеновские проекции частицы реголита, закрепленной на графитовом держателе.

На первом этапе решали задачу получения объемного цифрового изображения (модели) всей исследуемой частицы, включая ее поверхность и структурные элементы внутреннего объема методом рентгеновской объемной микроскопии (3D XRM). Полученная модель позволила уточнить геометрические размеры частицы, сделать предварительные выводы о внутренней структуре и была использована для выбора области интереса в дальнейших исследованиях.

Изучение структуры образца методом рентгеновской объемной микроскопии проводили на оборудовании Xradia Versa XRM-500 в лаборатории ООО «СМА». Образец для исследования фиксировали при помощи цианоакрилатного клея на острие заточенного графитового стержня-держателя для обеспечения высокой механической стабильности и отсутствия артефактов, связанных с дрейфом образца (рис. 1). Выбор материала держателя определялся низкой рентгеновской плотностью материала по сравнению с таковой для материала частицы (основа – оксид кремния) [7].

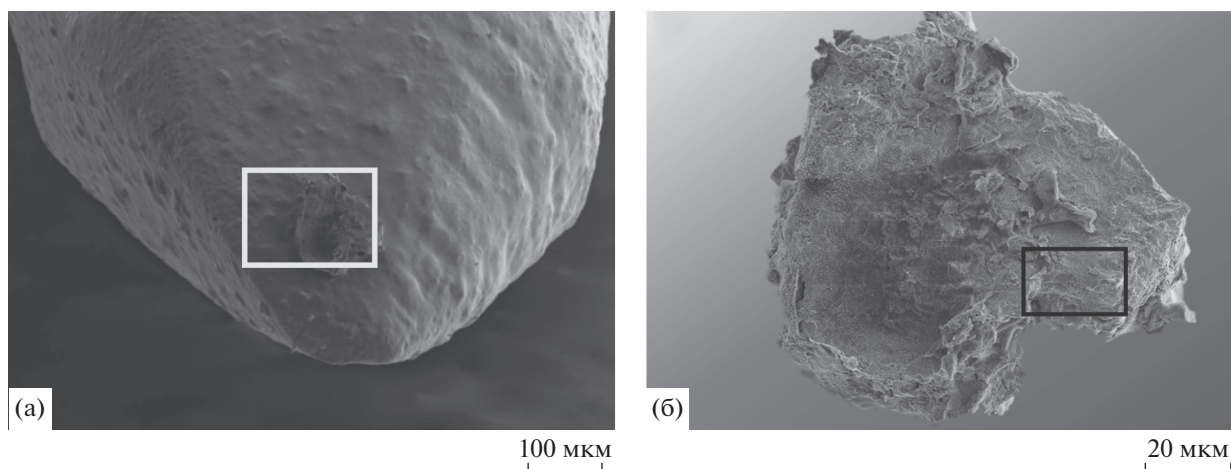
Набор рентгеновских проекций проводили при ускоряющем напряжении источника 50 кВ и токе пучка 80 мкА. Проекция получены при вращении образца вокруг оси в угловом диапазоне от  $-180$  до  $180$  градусов с шагом  $0.1$  градус. Время экспозиции одной проекции составляло 30 с, общее количество проекций – 3600 шт. Для детализации особенностей строения на микроуровне использовали оптическую систему 20-кратного увеличения получаемых рентгеновских проекций, являющуюся уникальной конструктивной особенностью данного оборудования.

Трехмерную реконструкцию рентгеновских проекций выполняли с использованием встроенного в оборудование программного обеспечения по алгоритму Filtered Backprojection с коррекцией дрейфа и увеличения жесткости пучка (Beam Hardening). Размер грани объемного пикселя (вокселя) на полученной модели после реконструкции составил порядка  $0.3$  мкм.

На втором этапе анализировали морфологию и элементный состав поверхности исследуемой частицы методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (МРСА). Элементный состав поверхности частицы определяли как на всей поверхности частицы (рис. 2а) [8], так и на выбранной области размером  $15 \times 12$  мкм (рис. 2б). Выбранная на основании данных рентгеновской объемной микроскопии и растровой электронной микроскопии с РСМА область являлась наиболее представительной (содержащей все присутствующие на поверхности частицы структурные особенности и химические элементы) для данной частицы.

Морфологию и элементный состав анализировали на двухлучевой аналитической системе Helios NanoLab 660, оборудованной ЭДС-анализатором EDAX Apollo, в лаборатории ООО «СМА». Изображения поверхности получали в режимах топологического и композиционного контраста (с использованием детекторов вторичных и обратно-рассеянных электронов соответственно) при ускоряющем напряжении электронной пушки  $2-5$  кВ. Элементный состав поверхности анализировали при ускоряющем напряжении электронной пушки 15 кВ. С помощью встроенного программного обеспечения EDAX TEAM получили карту распределения элементного состава образца по области  $15 \times 12$  мкм размером  $256 \times 200$  точек.

Структуру объема образца под поверхностью, выбранной на этапе 2, исследовали методом растровой электронной микроскопии (FIB/SEM) по технологии “Slice&View”, реализованной в двухлучевой аналитической системе FEI Helios NanoLab 660. Полученный по данной технологии массив физических срезов приповерхностной зоны частицы использовали для реконструкции объемной структуры образца в нанометровом масштабе. Технология “Slice&View” является комбинацией возможностей растровой электронной и ионной микроскопии. При помощи остророфоку-



**Рис. 2.** Электронно-микроскопические изображения частицы реголита, полученные методом растровой электронной микроскопии. (а) Белым прямоугольником выделена вся частица на графитовом стержне. (б) Черным прямоугольником выделена область картирования элементного состава в пределах частицы.

сированного ионного пучка ( $\text{Ga}^+$ ) происходит вскрытие поперечного сечения и послойное удаление материала образца с поверхности сечения. Захват изображения поперечного сечения осуществляется методом растровой электронной микроскопии.

На выбранный для исследования методом FIB/SEM участок образца (рис. 3) с помощью газонжекционной системы (GIS) наносили слой платины толщиной 1 мкм для защиты приповерхностных слоев от ионного повреждения. По периметру зоны интереса ионным пучком прокладывали траншеи для предотвращения осаждения материала, распыляемого в процессе создания серии поперечных срезов.

Послойное травление материала поперечного сечения выполняли ионным пучком при ускоряющем напряжении 30 кВ и силе тока пучка 3 нА. Толщина каждого удаляемого слоя материала составляла 50 нм. Изображение регистрировали в режиме композиционного контраста (с использованием детектора обратно-рассеянных электронов). Общее количество полученных изображений срезов составило 200 шт., размер области интереса составил  $20 \times 20 \times 10$  мкм.

Область для исследования методом аналитической просвечивающей микроскопии (ТЕМ) в соответствии с принципами корреляционной микроскопии выбирали в пределах зоны, исследованной методом растровой электронно-ионной микроскопии. В качестве такой области выбрали плоскость последнего поперечного среза в серии (рис. 4). Данный срез извлекали из частицы в виде ламели толщиной 1 мкм размером  $15 \times 10$  мкм (рис. 5) при помощи микроманипулятора Omniprobe, входящего в комплектацию двухлучевой аналитической системы Helios NanoLab.

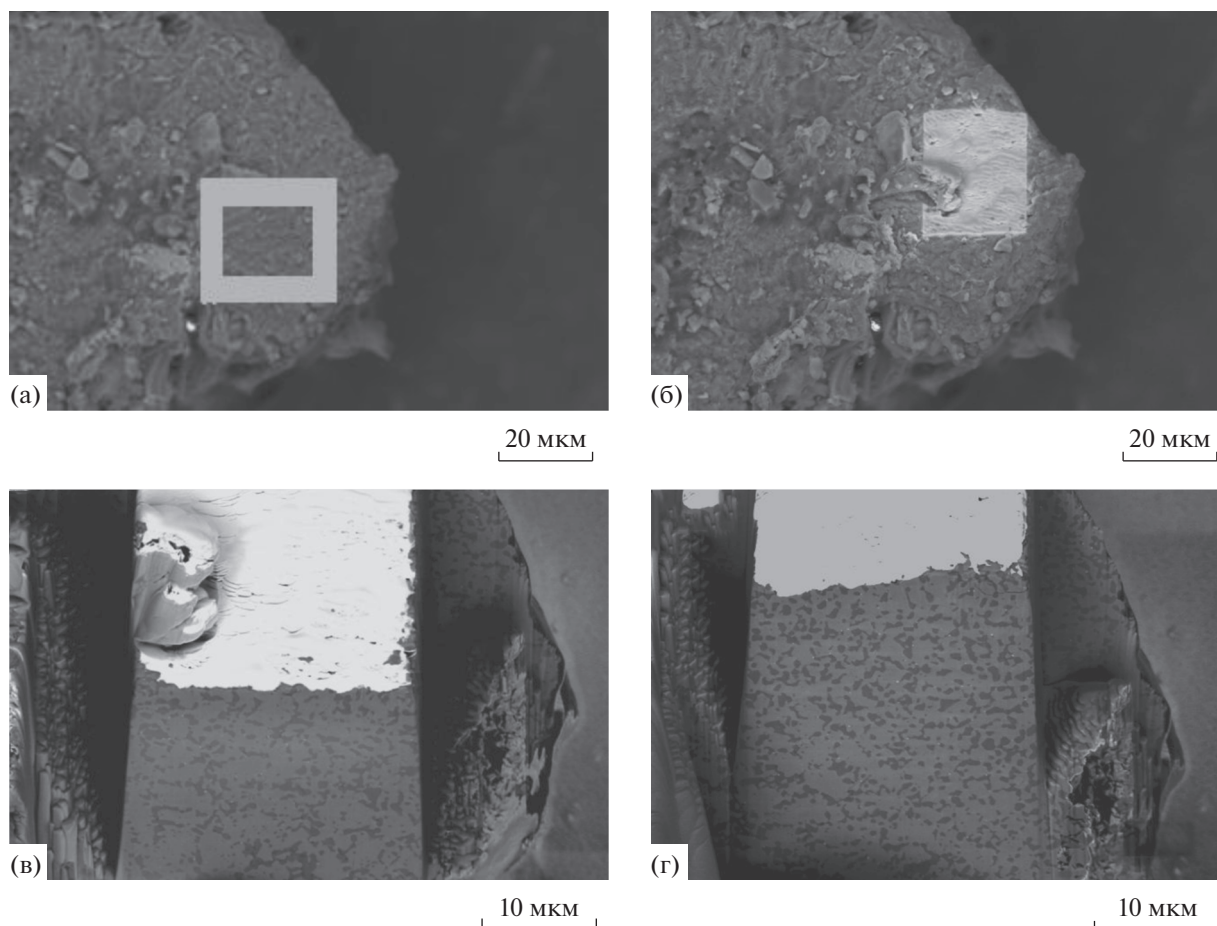
Затем полученную ламель закрепляли на специальном держателе и истончали при помощи фокусированного ионного пучка до толщины менее 100 нм.

Атомно-кристаллическую и наноструктуры, а также распределение элементного состава на наноуровне анализировали на аналитическом просвечивающем электронном микроскопе FEI G20 F20 S-TWIN с автоэмиссионным катодом, возможностью работы в режиме дифракции, оборудованном ЭДС-детектором EDAX Apollo при ускоряющем напряжении 200 кВ (рис. 6). Дополнительно получали изображения структуры образца в режимах просвечивающей растровой электронной микроскопии (рис. 7) и высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВРПЭМ).

Для уточнения элементного состава методом МРСА выполняли картирование представительной зоны интереса образца с нанометровым разрешением. Для определения минерального состава средствами электронной дифракции и ВРПЭМ анализировали атомно-кристаллическую структуру зерен минералов в пределах выбранных зон интереса.

Численный анализ исходных данных в виде отдельных поперечных срезов образца проводили с помощью коммерческого программного обеспечения FEI PerGeos с учетом всех данных, полученных на прочих этапах. Объемную структуру образца реконструировали с помощью комбинации инструментов Shear и Align. Коррекцию шума осуществляли с помощью фильтра Non Local Means. Для коррекции неоднородностей контраста использовали инструменты Z Drop Correction и Match Contrast.





**Рис. 3.** (а) Выбор области на поверхности частицы реголита для последующего изучения структурных особенностей внутри образца; (б) выбранная область на поверхности частицы с нанесенным платиновым слоем; (в) исходное поперечное сечение; (г) поперечное сечение, выполненное на глубине 10 мкм.

Сегментацию структурных составляющих в объеме выполняли в полуавтоматическом режиме с помощью инструментов Auto Thresholding (Otsu), Interactive Overlay Thresholding и Top Hat. Морфометрический и волюметрический анализы сегментированных структурных составляющих (гранулометрия, характеристики порового пространства и пр.) проводились с помощью инструментов Separate Objects/Labeling и Label Analysis.

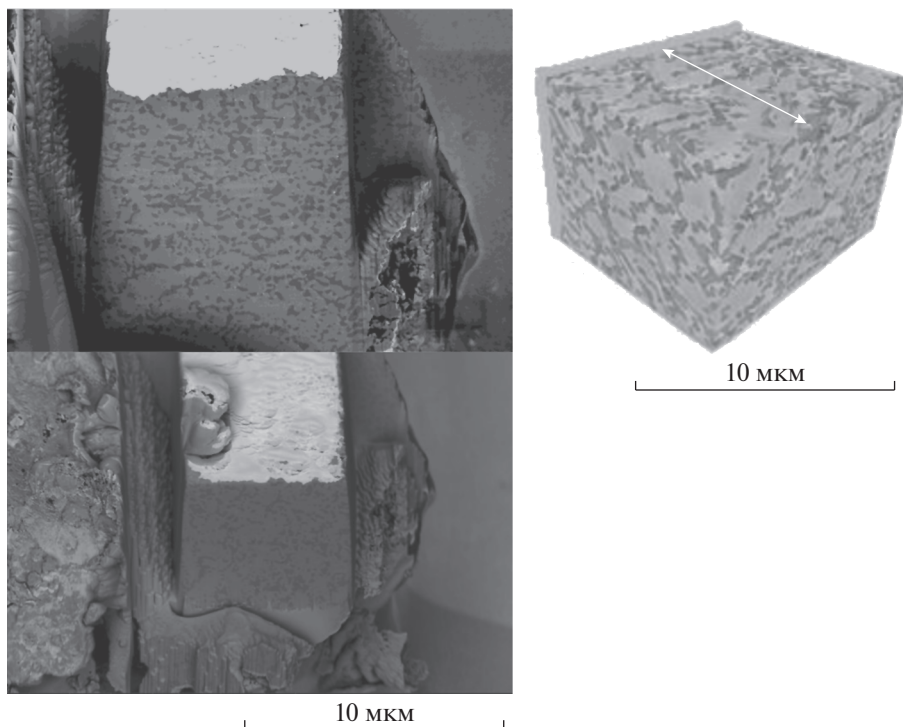
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом рентгеновской объемной микроскопии (3D XRM) получили трехмерную модель исследуемой частицы (рис. 8). Данная модель позволила уточнить геометрические размеры образца, а также провести предварительную характеризацию морфологии поверхности и объемной структуры частицы реголита. Уточненный размер частицы составил  $118 \times 69 \times 54$  мкм (по наибольшим осям); поверхность частицы имела умеренно выраженный рельеф. Внутренняя структура частицы неод-

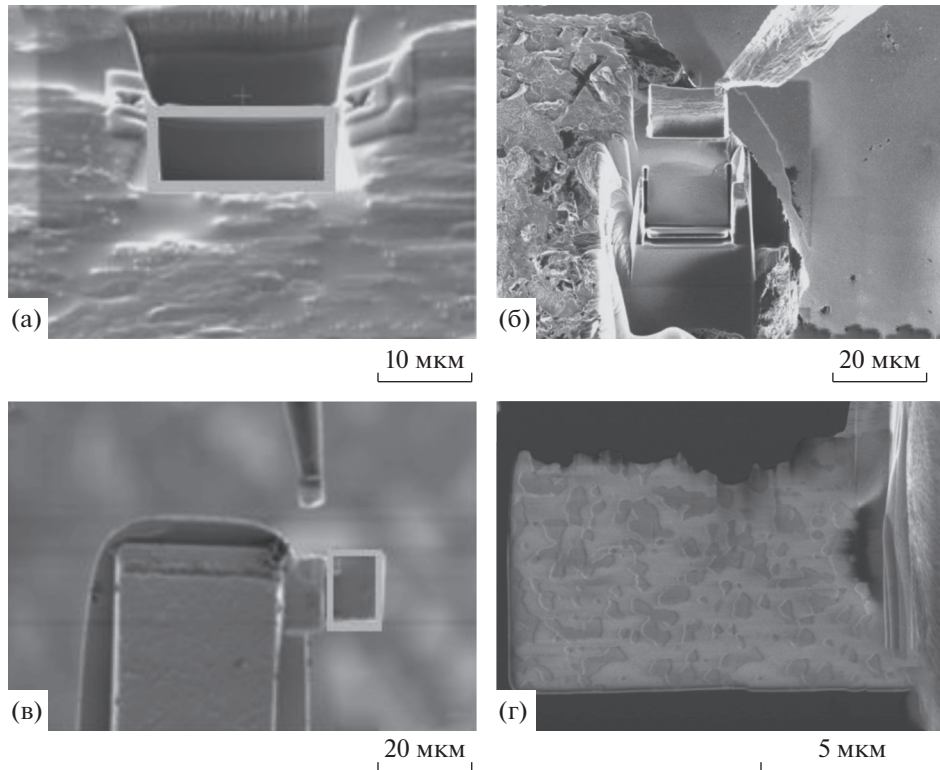
нородна, установлено наличие отдельных пор диаметром 2–6 мкм (рис. 9). Неоднородность контраста (уровня серого, зависящего от рентгеновской проницаемости материала) внутренней структуры частицы позволила сделать предположение о неоднородном характере структуры и состава частицы.

Как видно из рис. 9, при достигнутой разрешающей способности метода рентгеновской микротомографии определили и измерили параметры объектов размером вплоть до 1.5 мкм. С учетом обнаруженных отдельных пор и микрокристаллитов в частице реголита, приняли решение о проведении дальнейших исследований объемной структуры и состава образца с использованием высокоразрешающих методов, позволяющих получать структурную и композиционную информацию в субмикронном и нанометровом масштабе.

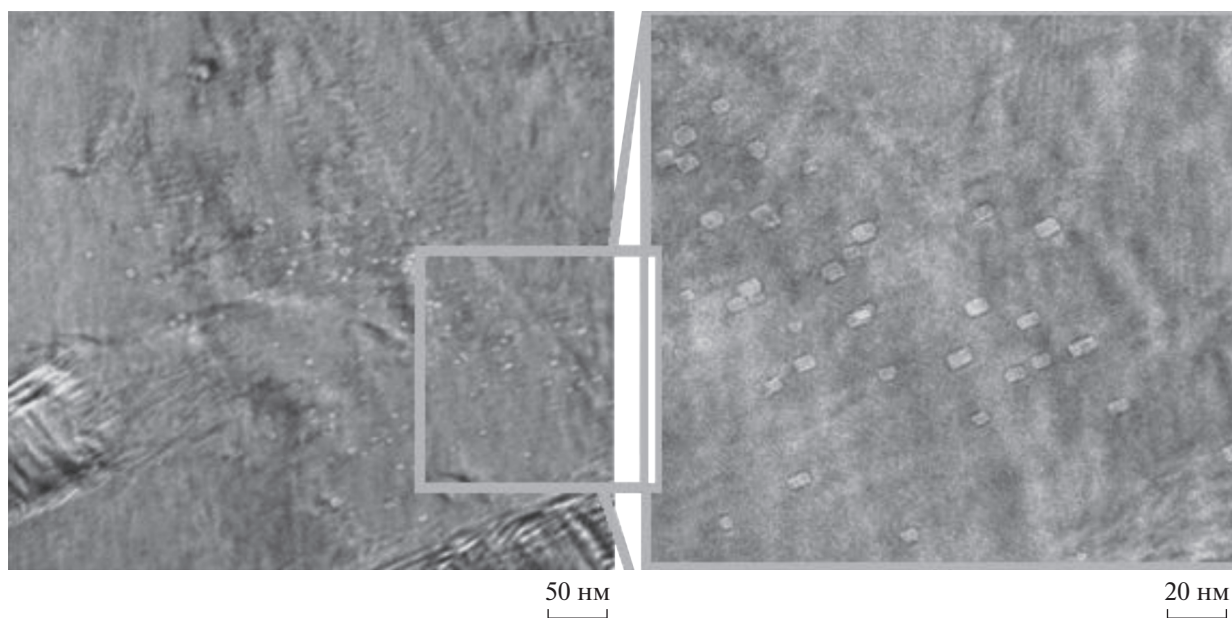
Полученные методом растровой электронной микроскопией (SEM) с энергодисперсионным микрорентгеноспектральным анализом (EDS) данные о морфологии и элементном составе участка



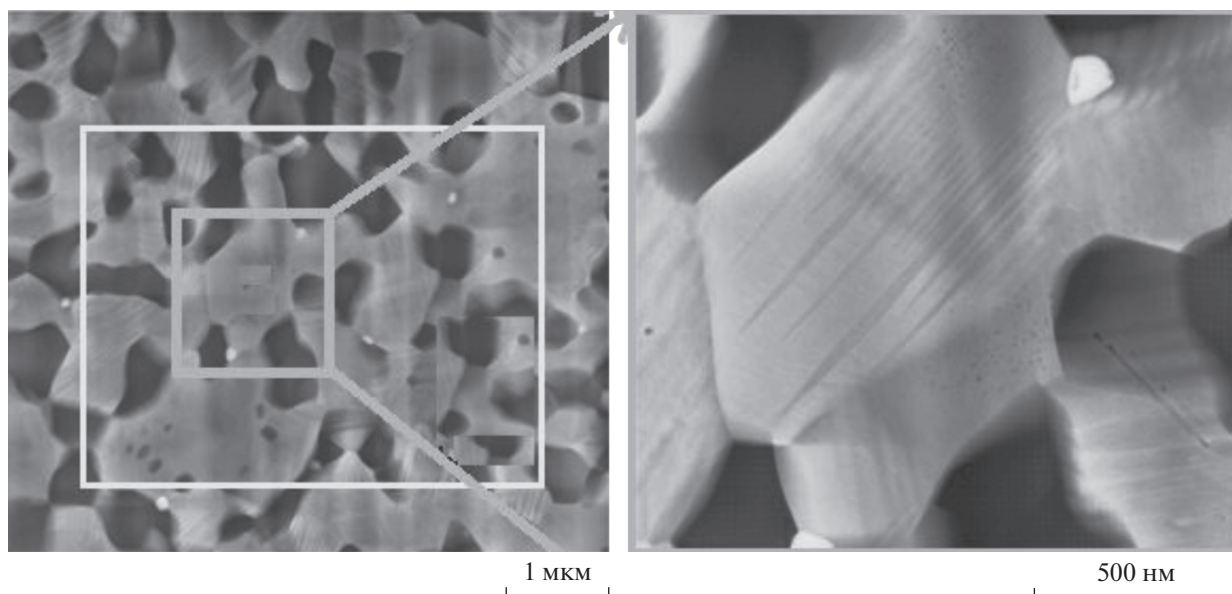
**Рис. 4.** Выбор области интереса для изготовления тонкого образца для просвечивающей электронной микроскопии.



**Рис. 5.** Последовательные стадии подготовки образца для просвечивающей электронной микроскопии. (а) Шаг 1 – создание тонкого поперечного сечения в заданном месте. (б) Шаг 2 – извлечение фольги из образца. (в) Шаг 3 – закрепление микрообъекта-фольги на держателе. (г) Шаг 4 – готовый образец.



**Рис. 6.** Изображения образца, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопией. Серым прямоугольником выделены области получения изображения при большем увеличении.



**Рис. 7.** Изображения образца, полученные с помощью просвечивающей растровой электронной микроскопией. Композиционный контраст. Серым выделена область получения изображения при большем увеличении. Белым выделена область, выбранная для картирования элементного состава энергодисперсионной спектроскопией, содержащая все элементы микроструктуры, имеющие характерный контраст. Изображения образца, полученные с помощью просвечивающей растровой электронной микроскопией.

поверхности образца позволили подтвердить гипотезу о неоднородном характере структуры частицы реголита. На поверхности частицы установлено наличие следующих химических элементов: O, Mg, Ti, Fe, Si, S, Al и Ca. При построении карты элементного состава участка поверхности частицы обнаруже-

ны области с однородным элементным составом. Наличие и характер распределения таких областей позволяют сделать предположение о полиминеральном характере состава исследуемой частицы. Соотношение данных областей по занимаемой площади составляет 46 (Ca-rich) : 54 (Fe-rich).



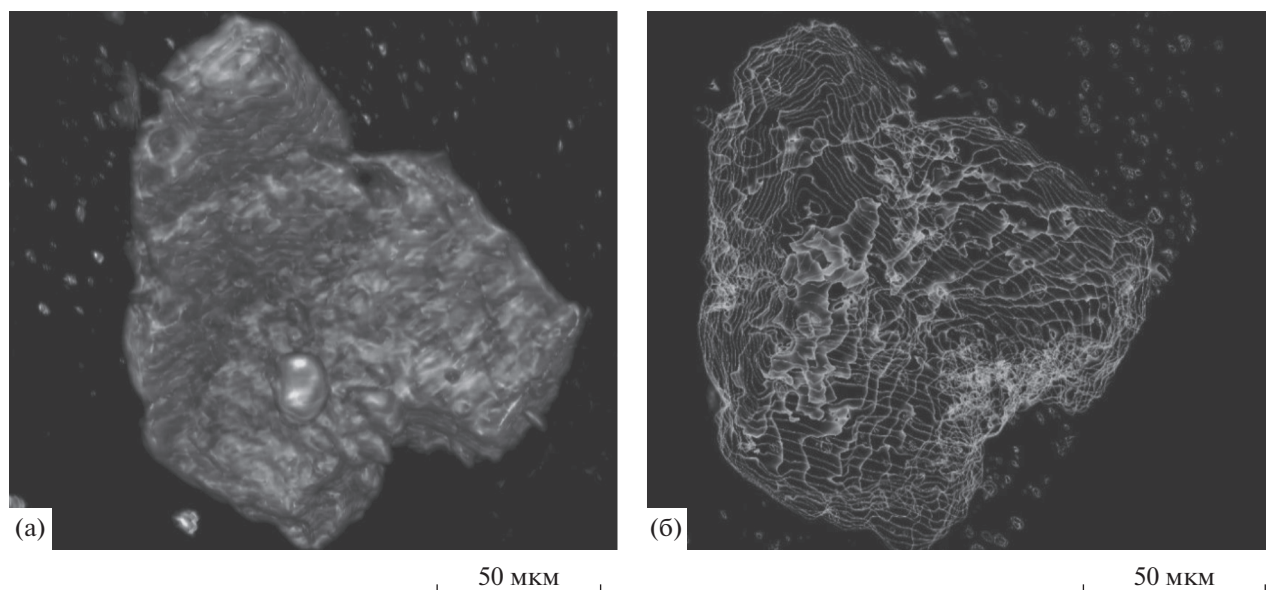


Рис. 8. Объемная модель частицы реголита, реконструированная на основе данных рентгеновской трехмерной микроскопии и визуализированная с помощью псевдоцветовой серой (а) и изолинейной топологической (б) схем.

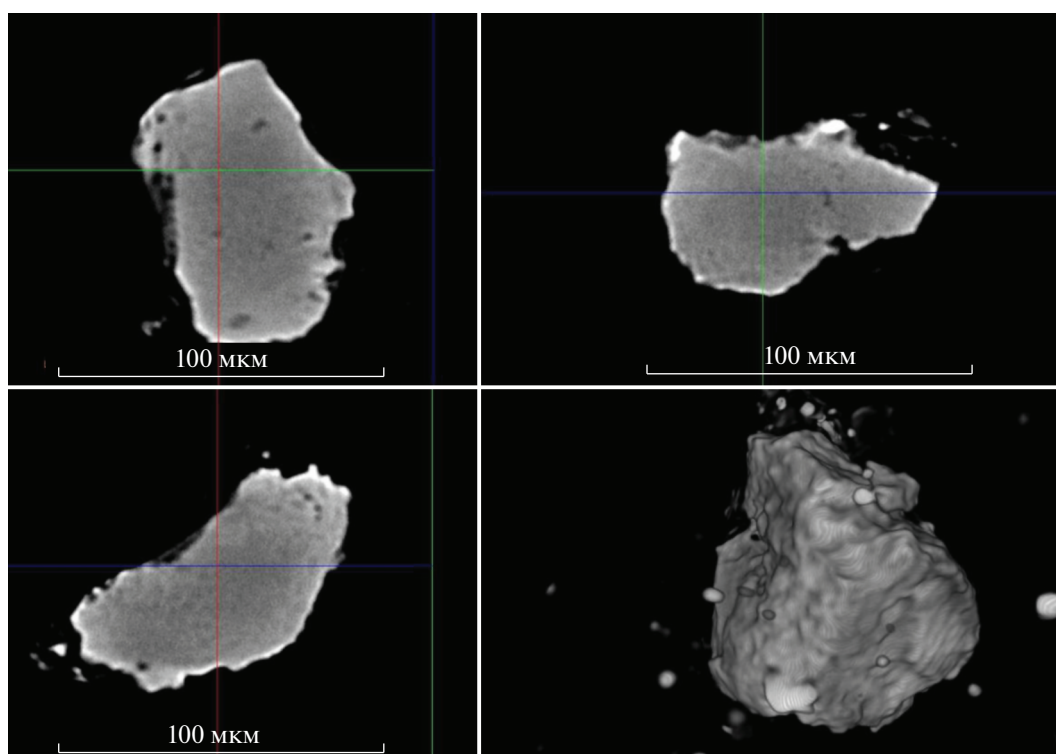
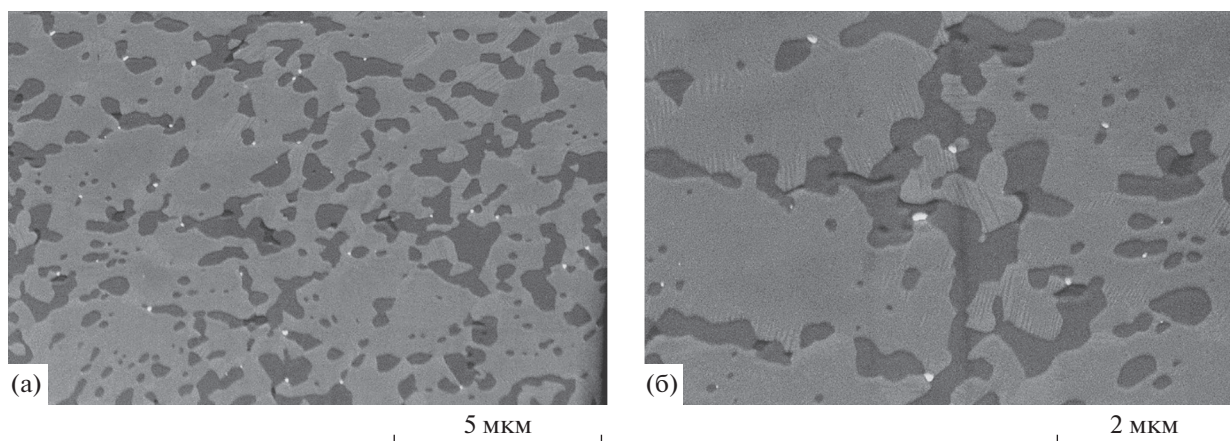


Рис. 9. Внутренняя структура объема в ортогональных виртуальных сечениях томограммы частицы реголита.

Исследование структуры образца методом растровой электронно-ионной микроскопии (FIB/SEM) позволило детализировать информацию об объемном распределении выявленных на поверхности частицы структурных элементах

(рис. 10). Кроме того, данное исследование позволило установить, отражает ли выявленное распределение элементов и областей однородного состава на поверхности частицы объемную структуру или же является артефактом по природе, т.е.



**Рис. 10.** Микрофотографии поперечного сечения образца в процессе исследования методом растровой электронно-ионной микроскопии. Композиционный контраст. Увеличение 30000 (а) и 60000 (б).

следствием загрязнений и прочих поверхностных воздействий при манипуляции с частицей.

Установлено, что структура в пределах реконструированного объема однородна по основным морфологическим параметрам. По уровню сигнала детектора обратно-рассеянных электронов отчетливо выделяются два типа областей однородного контраста (рис. 10а) (уровень серого на таких изображениях прямо коррелирует с усредненным атомным номером химических элементов), что согласуется с данными картирования элементного состава поверхности образца в исследуемой зоне интереса. Также установлено наличие третьего типа областей однородного контраста, представленного светлыми включениями между зернами с характерным размером 50–100 нм (рис. 10б). Кроме того, в структуре наиболее многочисленной фазы выявлены отдельные зерна более светлых (большой средний атомный номер, возможно обогащенные железом) пластинчатых выделений с характерным размером пластинок 50–150 нм. Помимо этого, в структуре объема образца реголита можно наблюдать области наиболее темного

контраста, соответствующие, очевидно, пустотному пространству, ассоциированному к зернам темно-серой фазы (наименьший средний атомный номер, меньшее содержание Fe, большее – Al), с характерными размерами единичных пор до 500 нм (рис. 10б). Ввиду физических ограничений разрешения методов РЭМ и ЭДС, состав данных включений удалось установить только при исследовании методом просвечивающей электронной микроскопии.

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что исследуемая частица реголита состоит из не менее трех основных минералов и содержит в структуре поры размером менее 0.5 мкм.

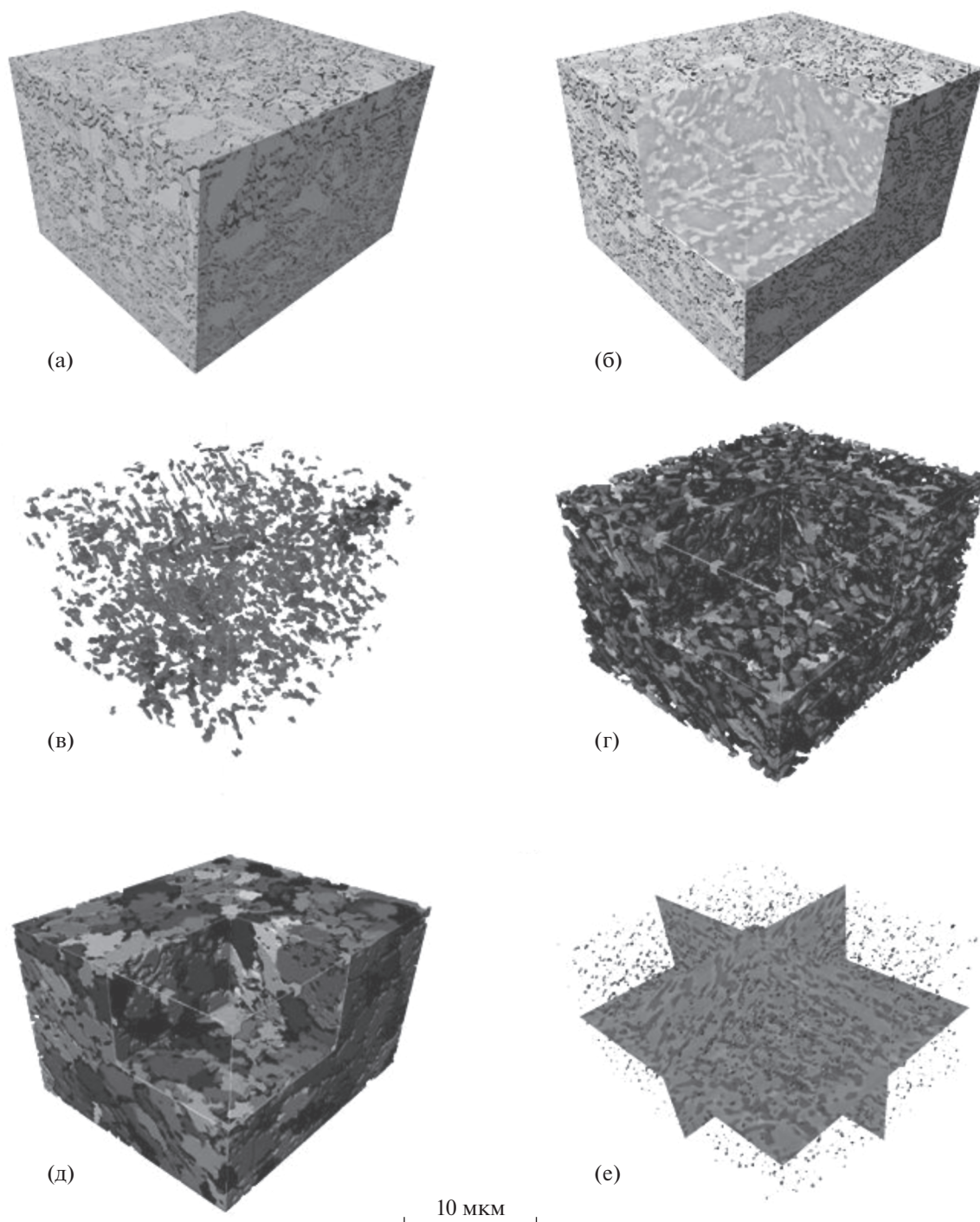
Численный анализ данных реконструкции объема, полученных методом растровой электронно-ионной микроскопии, позволил выделить четыре основных структурных элемента частицы реголита:

- Наиболее темные области контраста на микрофотографиях, полученных с использованием детектора обратно-рассеянных электронов, – пустотное пространство, представленное порами.

**Таблица 1.** Волюметрические и морфометрические параметры минеральных составляющих и пор в реконструированном объеме (рис. 11)

Параметр	Значение			
	поры	минерал А	минерал В	минерал С
Объемная доля, %	1.8	26.5	71.5	0.2
Длина, нм	120–1550	130–760	2000–12000	700–780
Ширина, нм	80–670	80–500	1000–5000	50–250
Преобладающий объем, мкм <sup>3</sup>	0.006–0.1	80–425	До 5700	120–240
Преобладающий размер, нм	200–800	200–400	3000–6000	150–300

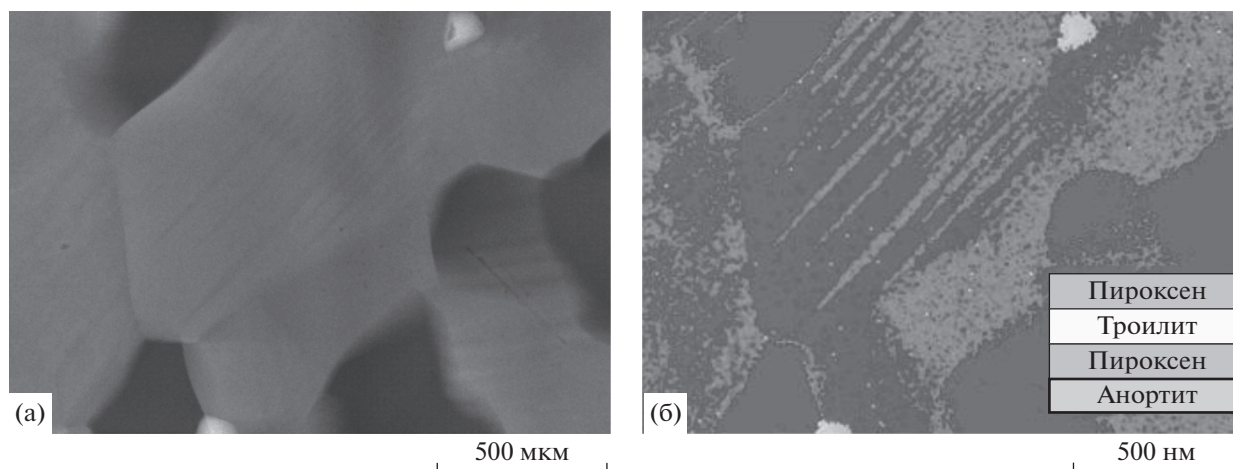




**Рис. 11.** Микроструктура объемного распределения минералов в частице лунного реголита. Численный анализ данных растровой электронно-ионной микроскопии: (а), (б) трехмерная визуализация области проведения численного анализа с сегментированным объемом отдельных структурных составляющих; (в) отдельные поры (распределение размеров пор отражено в градациях серого цвета); (г) отдельные зерна минерала А; (д) отдельные зерна минерала В; (е) отдельные зерна минерала С. Оттенки серого цвета на изображениях не привязаны к каким-либо параметрам зерна.

- Области темно-серого контраста – минерал А.
- Области светло-серого контраста – минерал В.
- Наиболее светлые области, представляющие собой включения между зернами, – минерал С.

После проведения сегментации и численного анализа данных определили основные морфометрические и волюметрические параметры минеральных составляющих и пор (рис. 11, табл. 1).



**Рис. 12.** (а) Изображение зоны картирования элементного состава, полученное с помощью просвечивающей растровой электронной микроскопией. (б) Результаты картирования минерального состава и таблица соответствия ему в оттенках серого.

С помощью инструментов аналитической просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) (электронно-зондовый микрорентгеноспектральный анализ, ВРПЭМ, электронная дифракция) уточнили данные о структуре и элементном составе образца, а также идентифицировали обнаруженные минералы и получили данные об атомно-кристаллическом строении образца (тип и параметры кристаллической решетки). Подробная информация об исследовании данными методами приведена в работе [9].

Полученные в режиме композиционного контраста изображения позволили подтвердить наличие в структуре образца трех типов областей, имеющих однородный контраст, соответствующих различным минералам, а также наличие в структуре образца наноразмерных пор (рис. 6). После проведения идентификации минералов удалось установить следующие соответствия: минерал А – анортит; минерал В – пироксены; минерал С – троилит.

Картирование элементного состава методом электронно-зондового микрорентгеноспектрального анализа показало, что распределение элементного и минерального составов хорошо коррелируют с данными, полученными средствами

растровой электронной микроскопии (рис. 12, табл. 2).

При детальном исследовании структуры образца методом просвечивающей электронной микроскопии выявили такие детали, как структура распада пироксена и форма выделений троилита (рис. 13). Карты распределения отдельных элементов соответствуют элементному составу обнаруженных минералов. Распределение кальция и железа в зернах пироксена характеризуют природу наблюдаемых структур распада (пижонит – авгит). В теле зерен пироксена выявлены ограниченные, когерентно ориентированные в кристаллической решетке поры размером до 10 нм.

\* \* \*

Предложенный методический подход позволил провести комплексное мультимасштабное исследование уникального образца частицы лунного грунта с сохранением 99.6% исходного образца, с разрешением от сотен микрон до единиц нанометров, с получением численной информации о размерах и геометрии (форме) частицы и сохранением цифрового образа частицы для дальнейших петрологических исследований. Определен полиминеральный состав частицы, выделены

**Таблица 2.** Оксидный и элементный состав минералов (мас. %) (рис. 12)

Минерал	CaO (Ca)	MgO (Mg)	– (S)	SiO <sub>2</sub> (Si)	TiO <sub>2</sub> (Ti)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Fe)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Al)	MnO (Mn)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Cr)
Пироксен-1	6.62	8.25	0.00	45.29	0.71	36.98	1.60	0.40	0.14
Анортит	18.02	2.21	0.00	47.94	0.19	3.50	28.02	0.11	0.02
Пироксен-2	12.62	7.54	0.00	44.78	1.42	26.06	6.89	0.39	0.30
Троилит	(0.00)	(0.00)	(25.35)	(0.00)	(0.93)	(72.51)	(0.00)	(0.47)	(0.74)

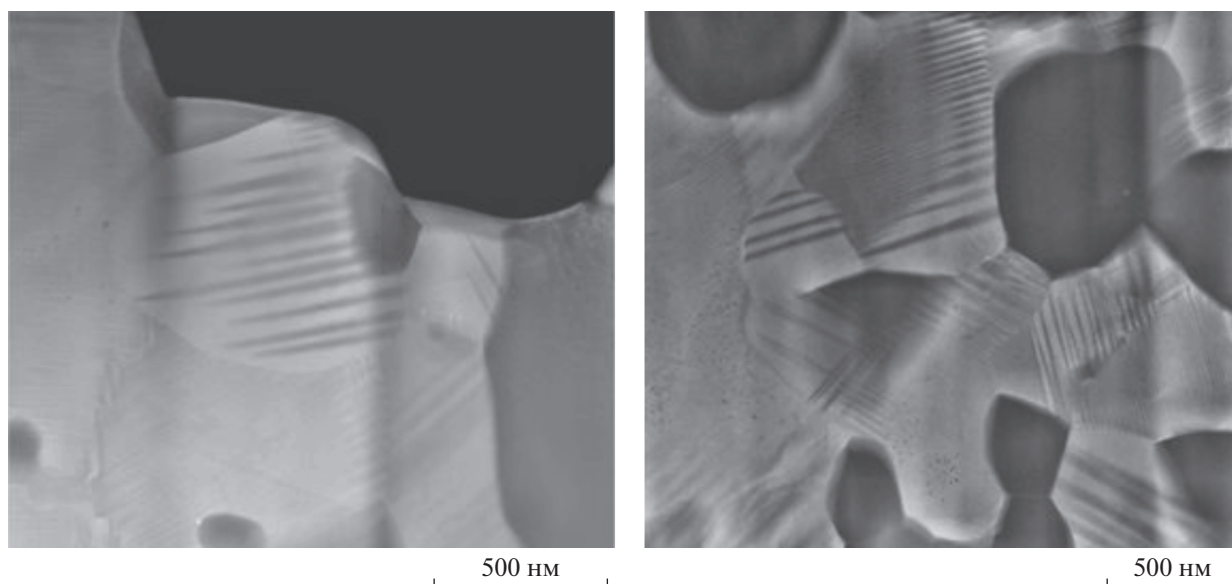


Рис. 13. Изображения образца, полученные с помощью просвечивающей растровой электронной микроскопией. Композиционный контраст. Структура распада пироксенов.

особенности наноструктуры зерен пироксена (структуры распада), определены размеры и построены объемные распределения для зерен каждой из минеральных составляющих, определена общая пористость в субмикронном масштабе. Метод мультимасштабной и мультимодальной объемной микроскопии может быть использован при исследовании любых уникальных объектов, что особенно важно в условиях ограниченного количества материала для анализа и, прежде всего, при исследовании внеземного вещества (метеоритов и образцов грунта малых и планетных тел Солнечной системы).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Slyuta E.N.* Geology, geochemistry and geophysics of the Moon: priority scientific tasks, research methods and scientific equipment / 51st Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute. The Woodlands, Texas, USA, 2020. P. 1099.
2. *Виноградов А.П.* Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией "Луна-16" / Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974. С. 7.
3. *Тарасов Л.С., Иванов А.В., Флоренский К.П., Родэ О.Д., Назаров М.А.* Литолого-морфологические характеристики лунного реголита из материкового района Аполлоний / Лунный грунт из материкового района Луны. М.: Наука, 1979. С. 63.
4. *Тарасов Л.С., Иванов А.В., Высочкин В.В., Родэ О.Д., Назаров М.А., Шерстюк А.М.* Приемка и первичное исследование колонки реголита "Луны-24" / Лунный грунт из Моря Кризисов. М.: Наука, 1980. С. 45.
5. *Vaniman D., Dietrich J., Taylor G.J., Heiken G.* Exploration, samples, and recent concepts of the Moon / Lunar Sourcebook a User's Guide to the Moon. Cambridge Univ. Press., 1991. P. 5.
6. *Caplan J., Niethammer M., Taylor II R.M., Czymmek K.* The power of correlative microscopy: Multi-modal, multi-scale, multi-dimensional // *Curr. Opin. Struct. Biol.* 2011. V. 21. P. 686.
7. *Landis E.N., Keane D.T.* X-ray microtomography // *Mater. Charact.* 2010. V. 61. № 12. P. 1305.
8. *Garratt-Reed A., Bell D.* Energy Dispersive X-Ray Analysis in the Electron Microscope. Oxford, U.K.: BIOS Scientific Publishers Limited, 2003. 151 p.
9. *Holzer L., Muench B., Wegmann M., Gasser P., Flatt R.J.* FIB-nanotomography of particulate systems—Part I: Particle shape and topology of interfaces // *J. Am. Ceram. Soc.* 2006. V. 89. № 8. P. 2577.
10. *Utke I., Moshkalev S., Russell P.* Nanofabrication using focused ion and electron beams: principles and applications. Oxford University Press. 2012. 840 p.
11. *Шкловер В.Я., Казанский П.П.* Мультимасштабная объемная микроскопия: опыт применения в биомедицинских исследованиях // *Медицинская физика.* 2015. V. 65. № 1. P. 79.
12. *Leroux H., Devouard B., Cordier P., Guyot F.* Pyroxene microstructure in the Northwest Africa 856 martian meteorite // *Meteorit. Planet. Sci.* 2004. V. 39. № 5. P. 711.
13. *Fronde J.* Lunar Mineralogy. New York and London: John Wiley & Sons, 1975. 323 p.
14. *Harries D., Langenhorst F.* The mineralogy and space weathering of a regolith grain from 25143 Itokawa and the possibility of annealed solar wind damage // *Planets and Space.* 2014. V. 66. P. 163.
15. *Papike J., Simon S.* The lunar regolith' chemistry, mineralogy, and petrology // *Rev. Geophys. Space phys.* 1982. V. 20. № 4. P. 761.