ATLAS OF PHOTOMICROGRAPHS OF THE SURFACE STRUCTURES OF LUNAR REGOLITH PARTICLES

АТЛАС МИКРОФОТОГРАФИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

O. D. Rode, A. V. Ivanov, M. A. Nazarov
A. Cimbálníková, K. Jurek, V. Hejl

О. Д. Родэ, А. В. Иванов, М. А. Назаров
А. Цимбальникова, К. Юрек, В. Гейл

ACADEMIA / PRAHA

ATLAS OF PHOTOMICROGRAPHS OF THE SURFACE STRUCTURES OF LUNAR REGOLITH PARTICLES

This pictorial book presents the results of international cooperation in the study of lunar rock samples. The investigation was carried out by the research workers of the Vernadski Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, USSR Academy of Sciences, Moscow, and of the Geological Institute, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, within the scope of the Intercosmos Program. The morphology of the lunar regolith particles is presumed to indicate the character of exogenic processes acting on the Moon surface and their effects. A study of the genesis of the surface forms of these particles provides a valuable source of information on the geological history of the latter and on the genesis of the secondary lunar rocks.

The surface features of the lunar regolith particles collected by Soviet automatic probes from the lunar mare (Luna 16) and highland (Luna 20) regions were examined with a scanning electron microscope and are shown here in 164 photomicrographs.

The accompanying text is divided into four chapters. The introductory part presenting a general characterization of the lunar regolith is followed by the description of the investigation methods employed. The main section is concerned with morphological characteristics of the principal types of lunar regolith particles. After discussing the primary rocks of basaltic, gabbroid and anorthositic types, the authors deal with secondary rocks and secondary formations, i.e. breccias, agglutinates, glasses and glassy spheroidal particles, and eventually with metallic particles and inclusions in the rock fragments. Genetic interpretation of the micromorphology of the lunar particle surface is the subject of the final chapter.

This Atlas of photomicrographs accompanied by English and Russian texts is intended for a wide audience of experts. It may serve as a basis for comparative study of rock samples from other lunar sites or from other planetary bodies.

ACADEMY OF SCIENCES OF THE U.S.S.R.
V. I. VERNADSKY INSTITUTE OF GEOCHEMISTRY AND ANALYTICAL CHEMISTRY
CZECHOSLOVAK ACADEMY OF SCIENCES
GEOLOGICAL INSTITUTE

ATLAS OF PHOTOMICROGRAPHS OF THE SURFACE STRUCTURES OF LUNAR REGOLITH PARTICLES

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМ. В. И. ВЕРНАДСКОГО
ЧЕХОСЛОВАЦКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

АТЛАС МИКРОФОТОГРАФИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ *ЛУННОГО РЕГОЛИТА*

ACADEMY OF SCIENCES OF THE U. S. S. R.
CZECHOSLOVAK ACADEMY OF SCIENCES

Scientific Editor
Kiril Pavlovitch Florenskij, chief of Laboratory of Comparative Planetology of the V. I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry

Reviewer
Academician Vladimír Zoubek

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ЧЕХОСЛОВАЦКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Научный редактор
Кирил Павлович Флоренский, руководитель лаборатории сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского

Рецензент
Академик Владимир Зоубек

ATLAS OF PHOTOMICROGRAPHS OF THE SURFACE STRUCTURES OF LUNAR REGOLITH PARTICLES

550.2

АТЛАС МИКРОФОТОГРАФИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

O. D. Rode, A. V. Ivanov, M. A. Nazarov
A. Cimbálníková, K. Jurek, V. Hejl

О. Д. Родэ, А. В. Иванов, М. А. Назаров
А. Цимбальникова, К. Юрек, В. Гейл

2999

ACADEMIA / PRAGUE 1979
АКАДЕМИЯ / ПРАГА 1979

© *Academia, Prague 1979*
English Translation © H. Zárubová

CONTENTS

Preface / 9

Introduction / 17

Lunar Regolith, General Characteristics / 17

Methods of Investigation of the Surface of Lunar Regolith Particles / 21

Morphological Characteristics of the Surface of Lunar Regolith Particles / 23

Primary Magmatic Rocks and Mineral Grains / 23

Basaltic Rocks / 23
Gabbroid Rocks / 24
Anorthositic Rocks / 24
Mineral Grains / 25

Secondary Rocks and Secondary Formations / 26

Breccias / 26
Agglutinates / 27
Glasses / 28
Glassy Spheroidal Particles / 29

Metallic Particles and Inclusions / 33

Conclusion / 35

Genetic Interpretation of the Surface Morphology of Lunar Regolith Particles / 35

Summary / 40

References / 74

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие / 13

Введение / 43

Лунный реголит, общая характеристика / 43

Методы исследования поверхности частиц лунного реголита / 48

Морфологическая характеристика поверхности частиц лунного реголита / 50

Первичные магматические породы и минеральные зерна / 50

Породы базальтового типа / 50
Породы габброидного типа / 51
Породы анортозитового типа / 52
Минеральные зерна / 53

Вторичные породы и образования / 54

Брекчии / 54
Агглютинаты / 55
Стекла / 56
Стеклянные сферические частицы / 58

Металлические частицы и металлические включения / 63

Заключение / 65

Генетическая интерпретация микроморфологии поверхности лунных частиц / 65

Резюме / 71

Литература / 74

PREFACE

The rapid evolution of technology and mathematical methods in this century has led to the recognition and accumulation of a large quantity of scientific facts. At the same time, however, in studying natural bodies, primary attention has not been paid to their total character; the body either ceased to be an individual, as in the case of mathematical methods, or has become a complex of separate, not always closely connected characteristics examined by laboratory analyses. The goniometric study of a crystal, for example, has developed into the determination of constants of the crystal lattice, but the examination of minerals from a specific deposit was concerned primarily with the chemical analysis of their admixtures.

In geological sciences a thorough morphological investigation has preserved its original importance, particularly in geomorphology and paleontology. Even in petrography, the three-dimensional description of rocks was replaced by the study of thin sections, since the optical microscope does not permit examination of an uneven surface as a result of a restricted depth of observation field.

The art of ancient naturalists of conceiving the object in its entirety, with all its particularities, has not developed with time, as would have been desirable.

At present, important information on the character and evolutionary history of an object may be obtained by studying its external features. Attempts have been made to use information theory and formalized morphology but they have not yet found wide application in practice. It is the morphological description and illustration that still yield the best picture of the object studied. The scanning electron microscope made it possible to examine the surface features of an object at large magnification and singularly improved the possibility of morphological analysis.

The submitted "Atlas of Photomicrographs of Surfaces of Lunar Regolith Particles" is a first attempt at a systematic survey of morphological observations based on the results of the Luna 16 and Luna 20 sample investigations. It is meant to serve as a basis for further investigations of the history of lunar regolith particles, since some of the conclusions made by the authors are only tentative interpretations that call for further documentation and verification. Regrettably, analogous studies of terrestrial rocks are few, although their importance for lithology is, without a doubt, very significant.

The lunar regolith is a sedimentary rock composed of a mixture of polygenetic allogenic particles. Every particle has its own history; it is an individual that may have been derived from various places on the Moon. Statistical probability of the

identification of particles from distant areas decreases with increasing length of transport, but in principle it is not limited by transport distance. The primary particles form one of the principal components of the lunar regolith. Their sources are igneous, mainly low-mobile effusive rocks of lunar maria, and particles of highland rocks. The latter are most commonly products of the regional metamorphism of primary rocks and consist of fragments of the solid highland breccias, greatly enriched in anorthite.

The lunar dynamic metamorphism is predominantly of impact-explosive nature, but the highland breccias were produced by intensive explosive activity affecting large rock masses which behaved as a whole. It seems that this explosive process gave rise to massive breccias, which are probably of great thickness. In the Atlas they are classified with rocks of anorthositic type and should not be mistaken for regolith breccias representing another specific rock type.

Another important component of the regolith are secondary particles, which can be denoted as products of "cosmogenic metabolism" of primary lunar rocks. This group includes elements formed on the lunar surface itself; they are peculiar features of the lunar regolith and exceedingly rare on the Earth's surface. These particles are predominantly products of impact thermometamorphism, which is characterized by diverse melting to remelting and vitrification of particles. Components of this type characterize maturity of the regolith, i.e. the length of its exposure on the lunar surface. These particles differ most widely in composition from the primary rocks. They display the effects of fractionated evaporation and reduction, and cosmogenic isotopes appear in them. Even the lowest degree of impact heating causes formation of regolith breccias and agglutinates. This process may recur many times.

Finds of other new formations in the lunar regolith cannot be interpreted unequivocally from mere visual examination. Two morphological types may be distinguished:

a) Well crystallized minerals in rock cavities, which were obviously formed after crystallization of the bulk of the rock, i.e. in the existing cavities. These minerals may be regarded as new formations and associated with the development of regolith but probably not with the last magmatic phases.

b) Drops of dispersed metal occurring on the surface of some glassy particles. The authors admit that these drops may have formed by condensation but, as no satisfactory evidence has yet been evinced for this explanation, it must be regarded only as one plausible interpretation.

From general consideration of the development of the lunar surface under the influence of impact-explosive effects it can be inferred that part of the evaporated material must undoubtedly condense in the regolith. The question, however, remains whether a dropwise condensation would take place or whether the condensate would settle from the gaseous phase in the form of a thin film on the surface of the host particle. Observations of condensates in our material must, therefore, be regarded as inconclusive, with regard to origin, but not as a negative response to the above

proposition. X-ray-chemical study of the regolith particle surfaces has revealed a number of peculiarities in the chemistry of the surface layer. For example, elementary forms of Fe, Ti and Si were found in it, but it is not known whether these elements had been accumulated as a result of the reduction effects of solar wind particles, or of the condensation of the vapor phase produced by explosion. These problems call for further study.

It must be noted that the endeavor to find traces of explosive volcanism on regolith particles, which would warrant the assumption of their pyroclastic origin, has proved unsuccessful. The sharp contact of the vitrified parts of individual particles with the rock indicates a high temperature gradient, which is possible only by heating the particle surface to a high temperature for a very short duration. The porosity of glasses and the amount of voids show that saturation with respect to gases was insufficient to produce explosion. This observation is consistent with the lack of volatiles in the lunar rocks, and with widespread, quietly outpoured lava flows, which are known from morphological study of the lunar surface.

This does not preclude the possible existence of pyroclastic materials on the Moon but indicates that their distribution is in any case restricted.

It is worth mentioning that metallic particles composed of extralunar meteoritic material are rather rare in the regolith.

Among the peculiarities of the surface structure of the regolith particles of various types, microcraters produced by high-velocity impacts deserve particular attention. The terminology applied for the morphological features of large impact craters is used in their description. It should be borne in mind that the processes causing similar forms may be different. For example, in a large crater on the planet surface, the crater rim is a positive element in relation to the original surface. The position of the rim corresponds to the maximal tangential shifts which result in the folding and rucking up of moving material.

Other features originate at a micro-impact on the brittle target, unless its material has been weakened by heat. The positive 'rim' (relative to the original shape of the target) is not always preserved, but a chip surface, i.e. a negative relief form, originates at the place of maximum shift. In this case, the crater lip lies below the primary surface and is the result of conchoidal fracture of the glass. It is not simply an analogue of the rim of a large planetary crater.

The objective of this Atlas is not an exhaustive characterization of all lunar features, but to present the illustrative material available, complemented by a concise explanatory text. The Atlas provides a systematic display of the assembled material, to be used for the correlation and confrontation of surface features so far discovered on regolith particle surfaces with more complete results yet to be obtained by further studies. The Atlas should contribute to a better understanding of specific lunar processes and serve as a point of support for lithologic study of terrestrial rocks. In this respect the publication of the Atlas is an important contribution to the investigation of the lunar regolith.

The submitted work is a result of international cooperation in the study of lunar specimens between the USSR Academy of Sciences and the Czechoslovak Academy of Sciences. This fruitful cooperation was initiated at the suggestion of the head of lunar investigations in the USSR, Academician Alexander Pavlovich Vinogradov – the late vice-president of the USSR Academy of Sciences, and Academician Jaroslav Kožešník – president of the Czechoslovak Academy of Sciences.

The investigations have been carried out by research workers of the V. I. Vernadski Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, USSR Academy of Sciences, Moscow, and of the Geological Institute, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое развитие инструментальной техники и математических методов в XX в. привело к открытию и накоплению громадного количества научных фактов. Однако наряду с этим, при изучении естественных природных тел общая характеристика их была отодвинута на второй план, и природное тело или потеряло свою индивидуальность, как это произошло в математических методах, или стало рассматриваться как комплекс мало связанных между собой отдельных свойств, изучаемых в разных лабораториях.

Так, гониометрическое изучение отдельного кристалла превратилось в определение постоянных кристаллической решетки минерала, а при изучении особенностей минералов из конкретного месторождения на первое место выступил полный химический анализ примесей.

Тщательное морфологическое изучение объекта в геологических науках сохранило полное значение, главным образом, в геоморфологии и палеонтологии. Даже в петрографии полное трехмерное описание породы было заменено изучением ее плоских срезов (шлифов), так как оптический микроскоп вследствие малой глубины резкости не позволяет изучать неровную поверхность.

Искусство старых натуралистов видеть объект целиком со всеми его особенностями не получало должного развития.

Между тем изучение внешнего облика объекта дает важные сведения о его природе и истории развития. Попытки использовать теорию информации и формализованную морфометрию до сих пор не нашли широкого распространения, а наилучшее представление об объекте дает не его морфологическое описание, а прямое изображение.

Изобретение сканирующего электронного микроскопа позволило проводить тщательное изучение поверхности объектов при большом увеличении и чрезвычайно усилило возможность морфологического анализа.

Предлагаемый вниманию читателей „Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита", составленный по результатам исследования вещества „Луны-16" и „Луны-20", является первой попыткой систематизировать морфологические наблюдения и должен лечь в основу дальнейшего изучения истории частиц лунного реголита, хотя ряд заключений авторов остается в виде предположений, которые требуют дальнейшего обсуждения. С сожалением следует отметить, что подобных работ для земных горных пород проведено крайне мало, хотя их важность для литологии несомненна.

Лунный реголит – это осадочная порода с полигенетическим набором аллогенных частиц, которые ее слагают.

Каждая частица реголита имеет свою историю и является индивидуальным образцом, который может происходить из разных мест поверхности Луны. Статистическая вероятность появления частиц из удаленных районов уменьшается с увеличением расстояния переноса, но в принципе не ограничена им.

Одними из главных составляющих лунного реголита являются так называемые первичные частицы, источником которых являются, во-первых, магматические, в основном эффузивные спокойно излившиеся вулканические породы лунных морей и, во-вторых, частицы материковых пород, которые обычно являются продуктом регионального метаморфизма первичных пород и представлены частицами плотных материковых брекчий, сильно обогащенных анортитом.

Лунный динамометаморфизм имеет в основном ударно-взрывную природу, но материковые брекчии образовались в результате сверхмощных взрывных воздействий, охватывающих большие массы породы, ведущей себя как единое целое. Это приводит к формированию массивных брекчий, которые, вероятно, имеют значительную мощность. В атласе эти материковые брекчии отнесены к породам анортитового типа, и их не следует путать с реголитовыми брекчиями, представляющими особый тип породы.

Другой важной составляющей реголита являются вторичные частицы, которые можно назвать продуктом „космогенного метаболизма" первичных лунных пород. Это собственно новообразования на самой поверхности Луны, которые характеризуют основные особенности лунного реголита и являются большой редкостью на поверхности Земли.

Эти частицы в основном являются продуктом ударного термометаморфизма, проявляющимся в различной степени переплавления и остекловывания частиц. Эта часть реголита характеризует его зрелость, т. е. время пребывания на поверхности, или экспозиционный возраст. Она в наибольшей степени отличается по составу от материнских пород, так как в ней сказываются эффекты фракционного испарения, восстановления и появления космогенных изотопов. Меньшая степень точечного ударного нагрева приводит к образованию реголитовых брекчий или агглютинатов. Этот процесс может повторяться многократно.

Поиски других новообразований в лунном реголите при помощи визуальной оценки не дают однозначного истолкования. Авторы атласа предположительно относят к ним два морфологических типа:

а) хорошо образованные кристаллы, встречающиеся в пустотах породы. Несомненно, что эти кристаллы образовались после кристаллизации основной части породы, в уже оформленных пузырьковых камерах. Однако назвать их „новообразованиями" и связывать с процессами формирования реголита, а не с последними фазами магматического процесса, по-видимому, надо очень осторожно;

б) капельки распыленного металла на поверхности некоторых остеклованных частиц. Авторы допускают, что эти формы могут иметь конденсационное происхождение, однако это пока не имеет твердых доказательств и может быть принято только как одно из возможных объяснений.

Следует отметить, что, исходя из общих представлений о формировании поверхности Луны под влиянием массовых ударно-взрывных явлений, представляется несомненным, что часть испаряющегося вещества должна конденсироваться в реголите. Однако, будет ли при этом наблюдаться капельная конденсация или конденсат осядет из газовой фазы в виде сплошной тонкой пленки на поверхности частиц, остается неясным. Таким образом, морфологические поиски конденсатов, имеющих доказанное происхождение, в нашем материале следует признать до сих пор мало результативными. Это не значит, что этот вопрос решен отрицательно. Скорее всего конденсаты образуют тонкие пленки, которые трудно выделить визуально. Рентгенохимическое изучение поверхности частиц лунного реголита указывает на целый ряд особенностей химического состава поверхностного слоя. Так, там найдены в элементарном состоянии Fe, Ti и Si, однако пока неизвестно, происходят ли процессы накопления этих форм за счет восстановления частицами солнечного ветра или за счет конденсации пара этих элементов при взрыве. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Необходимо отметить, что попытки нахождения среди частиц реголита следов лунного эксплозивного вулканизма и приписывание им пирокластического происхождения не имели успеха. Контакт остеклованной части с породой имеет очень резкую границу, что свидетельствует о высоком температурном градиенте, возможном только при резком и очень кратковременном перегреве частицы с поверхности. Пористость таких стекол и количество пустот в них говорит о газонасыщенности, совершенно недостаточной для эксплозивных взрывов. Это согласуется с общей бедностью лунных пород летучими компонентами и широкой распространенностью спокойных излияний лавовых потоков, которые известны по морфологическому изучению поверхности Луны.

Это не исключает редкой возможности существования вулканогенных пирокластических материалов на Луне, но существенно ограничивает их возможное распространение.

Следует указать на присутствие в реголите достаточно редких металлических частиц, которые обычно представляют собой остатки железных метеоритов, т. е. имеют внелунное происхождение.

Среди особенностей строения поверхности частиц реголита в атласе особенное внимание обращено на высокоэнергетические ударные эффекты, вызывающие появление микрократеров различного типа. При этом в описании их использована терминология, известная по морфологии крупных ударных кратеров. Необходимо иметь в виду, что здесь может возникнуть несоответствие в процессах, вызывающих появление сходных форм. Так, в крупном

кратере на поверхности планеты вал кратера соответствует форме рельефа, положительной по отношению к первоначальной поверхности. Положение вала соответствует максимальному развитию тангенциальных сдвигов, приводящих к складкообразованию и нагребанию сдвинутого материала. При микроударе по хрупкой мишени, если не возникает частичного температурного размягчения ее, возникают другие явления. Положительный по отношению к первоначальной форме „вал" не сохраняется вовсе, а на месте максимального сдвига образуется откол, т. е. отрицательная форма рельефа. Таким образом, бровка кратера, возникающая при этом, лежит ниже первоначальной поверхности и является следствием раковистого излома стекла, а не является аналогом вала крупного кратера.

Однако следует помнить, что задачей атласа вовсе не является полное описание явлений, а представление иллюстративного материала, снабженного кратким пояснительным текстом. Атлас дается как систематизированный материал для сравнения и сопоставления наблюдаемых форм поверхности частиц реголита Луны с любым изучаемым читателем материалом. Он поможет глубже оттенить специфику лунных процессов и является вехой в литологическом изучении земных пород.

В этом отношении атлас представляет большой интерес, и его выпуск в свет является важным этапом в изучении лунного реголита.

Эта работа является результатом международного сотрудничества по изучению лунных образцов между Академией наук Советского Союза и Чехословацкой Академией наук, успешное начало которой было положено руководителем лунных исследований в СССР вице-президентом АН СССР академиком Александром Павловичем Виноградовым и президентом Академии наук ЧССР академиком Ярославом Кожешником и проведено сотрудниками Института геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского в Москве и Геологического института в Праге.

INTRODUCTION

LUNAR REGOLITH, GENERAL CHARACTERISTICS

The lunar soil – regolith – is a loose surface layer of the Moon, composed of fragmentary material of various sizes (including boulders), some of which was transported from the place of its original occurrence. This heterogeneous mixture, dark-gray or black in the maria and light-gray in the highlands, consists of minute fragments of crystalline rocks and minerals, of welded and brecciated agglomerates and partly melted particles. The average size of regolith particles (i.e. <1 mm) is controlled by the degree of its exogenic reworking; it varies between 60 and 100 μm as a rule.

The regolith material can be divided into two groups: the group of primary particles and that of secondary particles. The group of primary particles comprises fragments of local magmatic and metamorphic rocks of mare and highland regions and abundant mineral grains. The group of secondary particles includes material which underwent exogenic transformation of different intensity on the lunar surface: lithified consolidated fragments of breccias (enclosing small regolith particles), agglutinates, sintered aggregates, grains melted to various degrees or with partly melted surfaces, and glasses.

The bulk of the primary magmatic rocks of the mare regolith are fine-grained, dark-gray melanocratic ferrobasalts. The essential minerals of angular basalt fragments are plagioclase, pyroxene, olivine and ilmenite. Another representative of magmatic rocks in the mare regions is microgabbro, most frequently of yellow-brown tints and characteristic grain size of 0.3–0.5 mm. Microgabbro also occurs in angular fragments and contains the same essential minerals as the fine-crystalline basalt.

In the highland regolith the primary magmatic rocks are very rare. The bulk of highland rocks consists of impact-metamorphosed breccias, which are composed of plagioclases (predominantly), pyroxenes and olivines; minerals from the spinel group and ilmenite are subordinate. In chemistry, the highland rocks correspond to the rocks of the anorthositic series and to non-mare basalts which, relative to similar mare rock types, are richer in aluminum.

The essential minerals of lunar rocks are plagioclase, pyroxene, olivine and ilmenite. They form not only components of rock fragments but also separate grains.

Plagioclases are the most common minerals on the Moon. Clear, very pure plagioclase grains from the highland regolith are often bounded by cleavage planes and show distinct twinning. In the mare regolith the plagioclase grains are frequently turbid, milky white and their twinning is less marked.

Pyroxenes are represented in the lunar regolith by both monoclinic and rhombic types. Reddish-brown monoclinic pyroxenes are characteristic of the mare regolith, whilst clear, light green to yellow rhombic pyroxenes are typical of highland regolith.

Olivine is frequent as in mare so in highland regolith, in the form of well preserved yellow or yellow-brownish, often transparent grains of irregular shape. Olivine grains in the mare regolith samples contain inclusions of ore minerals.

Ilmenite is very abundant in the regolith of mare basins but rare in the highland regolith. Fragments of pink spinel occasionally occur in the samples.

Secondary particles are a genetically important component of the lunar regolith. Their character largely reflects the type of exogenic processes operating on the lunar surface and co-acting in the development of the regolith.

The fragments of lunar breccias forming a considerable proportion of lunar regolith are most frequently ligh-gray (in the highlands) and dark-gray (in the maria), with a rounded form and smoothed out surface. They formed by compaction and impact-lithification of fine-grained regolith material, as is shown by the general lithological character of breccia clasts and a relatively high portion of secondary glass fragments. The authors think the diffusion, partial melting at the grain boundaries and sintering under vacuum conditions to be the principal lithification processes.

An interesting type of secondary regolith rocks, which is rather unusual on the Earth, are agglutinates. They are brittle, dark-gray in mare regolith and lighter-gray in highland regolith, and have bizarre forms. Similarly to breccias, agglutinates contain all components of the regolith fines but they differ in having a higher glass content. They consist of particles of the uppermost loose regolith layer welded together by glass, which is generated by micrometeorite impacts.

A characteristic secondary product of the lunar regolith is secondary glass, which constitutes either splashes on the surface of various particles, or varicolored glassy spheroidal particles. The formation of glass splashes and spherules is associated with meteoritic impacts. These produce melting of lunar rocks, spraying and ejecting of the resultant silicate melt; the drops cool in flight to form glassy spheroidal particles or splashes on the surface of the regolith fragments.

An unusual type of regolith component consists of particles of metallic iron. They occur as irregularly-shaped fragments and rounded forms. Investigations have shown that some of them are of meteoritic origin and others are probably fragments of metallic iron enclosed in basaltic rocks.

The quantitative representation of particle types in the regolith samples is given in the Table.

The principal factor in the formation of the regolith was intensive bombardment of the lunar surface by meteorites and micrometeorites. Impact and explosion

processes caused by the fall of meteoritic bodies bring about the destruction and crushing of surficial lunar rocks and the ejection of disturbed material from impact craters. During the whole geological history of the Moon, the regolith was continuously reworked by impact processes, vertical displacement and horizontal transport of its particles. It cannot be excluded that even endogenic – volcanic – processes accompanied by explosions and destruction of material affected the origin of the loose surface layer. The influence of diurnal temperature variations, whose amplitude reaches 250–300°, on the disintegration of lunar rocks is more than probable.

The formation and evolution of the regolith are controlled not only by destruction processes but also by aggregation of individual regolith particles. Impact processes are a contributive factor in the aggregation process. Molten ejecta impacting the lunar surface must have cemented minute regolith particles into aggregates. Some of the aggregates formed by the fusing of regolith grains at the points of their contact as a result of their partial melting due to local impact-produced heating under vacuum conditions. Aggregation of particles may also be provoked by their electric charge and capacity of uniting readily into clusters. The role of aggregation processes increases with the reduction of particle size and with the length of exposure of the regolith surface layer.

The proportion of secondary particles in the regolith (agglutinates and secondary glasses) is an indicator of its maturity: the amount of secondary particles increases with the length of exposure and the degree of reworking of the regolith.

A study of the proportions of various particle types in the regolith samples from different lunar regions (see the Table) shows that secondary particles (breccias, agglutinates, glasses) strikingly predominate in the Luna-16 mare regolith. In contrast, the Luna-20 regolith sample is characterized by a relatively higher portion of local rock fragments and a minor amount of secondary particles. The relatively lower content of secondary material in the Luna-20 sample suggests that it is less reworked and, consequently, that the regolith at the place of sampling was exposed on the surface for a shorter period.

The proportions of particles determined in the Luna-20 sample cannot be used to establish the age of the highland regolith. The age of the highlands is greater than that of the maria. The properties and composition of the regolith from the area sampled by Luna-20 were very likely affected by the topography of the landing area on the outer slope of the Amegino crater rim. The formation of the regolith on an inclined surface is accompanied by a continuous downward movement of the clastic products and renewal of slope deposits, constantly reducing the exposure length of the slope regolith.

The study of the surface character of regolith particles may be an important source of information on the processes which were active on the lunar surface and which transformed the endogenic lunar rocks, and on the alterations that the lunar regolith particles experienced under the influence of various exogenic agents.

Representation of various particle types in coarse-size fraction of the mare (Luna 16) and highland (Luna 20) regoliths

Particle type	>0.9 mm	0.9—0.45 mm
Luna 16		
Microgabbro	15.8	13.8
Mare basalts	8.7	7.7
Highland anorthositic rocks	0.8	3.4
Mineral grains and glass	4.5	4.6
Regolith breccias	45.0	34.2
Agglutinates	24.2	34.8
Glassy spherules	1.0	1.5
Luna 20		
Microgabbro	2.9	1.3
Highland anorthositic rocks	61.3	52.8
Mineral grains and glass	1.1	9.6
Regolith breccias	20.0	17.6
Agglutinates	14.7	18.3
Glassy spherules	—	0.4

METHODS OF INVESTIGATION OF THE SURFACE OF LUNAR REGOLITH PARTICLES

Surfaces of lunar regolith particles were studied with a JEOL JXM-2 scanning electron microscope and a JEOL JXA-50A instrument, combining a scanning electron microscope and X-ray microanalyzer.

The function of the scanning electron system is based on the TV principle of moving a thin beam of electrons across the specimen to be examined.

Synchronous scanning produces on the screen of the instrument an enlarged image of the object with a great depth of field. The magnification of scanning electron microscopes is given by the ratio of beam deflection amplitudes on the screen and the object.

The principle and technical qualities of SEM make it possible to

1. examine specimens of relatively large size (the depth of field with SEM is approximately by two orders of magnitude greater than with analogous optical microscopes at similar magnification);
2. analyse the object without destruction or any special preparation (except for covering it with a thin film of carbon or gold);
3. scan the object without destroying it with a beam of electrons, which is of very low value (10^{-10} A – 10^{-12} A), so that it does not produce perceptible changes in the object by heating (it is estimated that at SEM the heating only exceptionally exceeds 100 °C).

The SEM method is widely used in examining geological specimens. It enables the geometry of the object, its undisturbed microcomposition and the configuration of its surface to be recognized, i.e. the parameters which may provide valuable information on the geological history of the specimen.

The chemical composition of the particles and the morphological elements of their surfaces were investigated using a JXA-50A instrument as an X-ray microanalyzer. The instrument is provided with three X-ray spectrometers enabling all the chemical elements from boron to uranium to be identified. Electric impulses generated by X radiation are transmitted to the screen of the instrument as points which compose an image of the distribution of each element on the specimen surface. The density of points is proportional to the content of the element examined. Having a resolution value of 1 μm, the instrument is capable of identifying chemical elements in very small specimens. The use of standard specimens of a known composition allows the weight concentration of elements to be determined from the intensity ratio. It should be noted, however, that accurate quantitative analyses are possible only on polished

surfaces. On an uneven surface only qualitative chemical composition can be established; semiquantitative analysis is feasible on relatively even surfaces, since the roughness of relief affects the intensity of the X-radiation.

The preparation technique of geological objects for SEM analysis and the study of their chemistry (if needed) by X-ray microanalyzer is simple. The specimens were first washed with acetone and after preliminary examination with MBS-2 and MPS-2 microscopes at low magnifications (up to 60×) they were transferred onto a sticky tape using a preparation pin. The tape (KLT-2) was affixed with a conductive paste onto the working planchet. As the geological objects are usually dielectrics, before scanning the specimen was coated in a vacuum with a thin film (10–20 nm) of conductive material to carry away the electric charge emitted by the electron beam scanning the surface of the specimen. For this purpose gold was generally used as it ensures a contrasting picture of the object. Where the surface relief of the sample was highly diversified, it was difficult to achieve a continuous layer of gold; therefore a thin film of carbon (10 nm) was first applied on its surface, which readily penetrates into pores and cavities and is highly conductive. The distortions caused by double coating are immaterial up to a magnification of several tens of thousands.

Images of regolith particle surfaces were produced using secondary electrons at accelerated potentials of 25 kV with the JSM-2 instrument and of 15–20 kV with the JXA-50A instrument. Magnifications ranged from ×20 to ×30,000 and the sizes of the specimens examined varied from 0.12 to 2.0 mm.

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF LUNAR REGOLITH PARTICLES

The micromorphological study of the lunar rock fragments provides information on their origin and geological history effected by a large number of processes that were active on the lunar surface. This chapter describes the surface features of the principal types of lunar regolith particles (from the Luna-16 and Luna-20 materials), as determined by the use of a scanning electron microscope and X-ray microprobe analysis.

PRIMARY MAGMATIC ROCKS AND MINERAL GRAINS

Basaltic rocks

The fragments of lunar basalts, both of mare and highland origin, are the principal components of the lunar regolith. They are of angular, irregular shape (Fig. 9); only fragments that underwent intensive exogenic reworking are more or less rounded (Fig. 1). The surface of basalt fragments is controlled by their fine-grained texture and the surface character of their minerals; the surface of basalts is usually rough and slightly hummocky (Fig. 6).

The overall surface morphology of basalt fragments is greatly affected by the processes that built up the lunar regolith. Impact effects such as craters and pits (Figs. 1–3, 5, 8, 10) are very frequent features of the basalt fragments. The craters are rounded depressions produced by low-velocity or high-velocity impacts. On the surface of polycrystalline basaltic rocks they usually show two morphological elements – an impact pit and a rim* surrounding it; in high-velocity impact craters both pits and rims are partially melted. The polycrystalline texture of crystalline rocks is not suitable for the formation of such clear-cut structure of impact craters as is found in isotropic glassy particles (see p. 28). Lunar impact craters on basaltic fragments range in size from a few μm to several tens of microns. Another impact feature is the pits represented by shallow, low-velocity impact depressions of irregular shape. Their form often depends on the rock texture and the shapes of rock-forming minerals.

* We use here the terminology that was accepted for the description of sections through impact craters of classical morphology.

Fine cracks of various lengths are widespread on the surface of basalt fragments (Fig. 7). They usually follow the contacts of individual structural zones in the rocks and their formation is obviously connected with impact events or with abrupt temperature changes during cooling of the basaltic magma.

The vugs observable on the surface of basalt fragments were formed by exposure of gas inclusions (Figs. 7, 8). The euhedral crystals, which often occur in the vugs, are the product of vapor condensation at a large-scale impact or of magma crystallization (Figs. 11, 12).

Besides the negative relief forms, the surfaces of basalt fragments also show positive formations such as splashes of silicate material. They were produced by melting of the lunar rocks at high-velocity meteoritic impacts and are typical of all kinds of regolith particles. The surfaces of basalt fragments may bear abundant attached particles of regolith dust.

Gabbroid rocks

Fragments of lunar microgabbro are distinguished by irregular shapes and complicated morphology, the structural elements of which are largely controlled by the forms of rock-forming minerals (Figs. 13, 15, 17, 20). The surface of fragments is diversified by a variety of impact deformations: pits (Figs. 15, 20), chip surfaces of step-like or conchoidal character (Figs. 15, 17, 20, 27, 29), and microcraters (Figs. 18, 19, 24, 26). The polycrystalline character of gabbroid rocks generally impeded a perfect evolution of the morphology of craters. The craters of relatively large size show irregular shape and complicated, highly uneven surfaces (Fig. 24). Morphologically well developed craters in gabbros occur rather on the surface of individual mineral grains (Figs. 18, 19).

Cracks and crack systems radiating from the impact centers (Fig. 14) are also regarded as impact deformations. The impact-produced cracks often follow the boundaries of minerals (Fig. 23). Silicate splashes and attached glassy spheroidal particles (Fig. 16) are other surface features of the microgabbro fragments. The splashed material is occasionally of Fe-Ni composition, which suggests its meteoritic origin.

The minerals in microgabbros display a different degree of reworking. The surface of some fragments is strongly affected by lunar erosion, whilst that of others is strikingly fresh, with well defined inductive striation (Fig. 18).

Anorthositic rocks

Fragments of rocks of the ANT (anorthosite-norite-troctolite) suite are represented particularly in the highland regolith. They vary considerably in both size and form. In the regolith samples, particularly in Luna-20 material, the forms and surfaces

of anorthositic fragments are strongly modified by lunar erosion (Figs. 31, 37). Angular fragments of ANT rocks of fresh appearance are very rare (Fig. 35).

Predominant morphological elements in the ANT rock suite are impact deformations, mainly low-velocity forms. Chip surfaces, pits and shallow craters often cover the major part of the fragment surface (Figs. 31, 37). The low-velocity impact features are of varied character; the fragment surface is sometimes intersected by step-like faults, which follow mineral cleavage (Fig. 38). The high-velocity impact deformations appear as craters with well developed pits and rims (Figs. 35, 36), but occasionally these morphological forms are partly melted or completely molten.

The study of the ANT rock surfaces has revealed pores of various dimensions and configuration. The generation of pores is probably associated with crystallization or recrystallization of rocks. The walls of pores are frequently strewn with mineral grains showing outstanding growth steps on the surface (Fig. 39).

On the surface of rock fragments of ANT composition there are also various positive relief forms, among which attached fine regolith particles are most abundant (Figs. 31, 36). They variegate the overall relief of rock fragments and of protruding isometric grains of plagioclases, which predominate in the ANT rocks (Figs. 31, 34). Of particular importance for the relief configuration are inclusions of accessory minerals (Fig. 43) and metallic iron (Figs. 31, 37). Metallic iron inclusions display a particular microrelief of their own (Figs. 32, 33, 163, 164).

Mineral grains

The surface of minerals has been studied on plagioclase, olivine and pyroxene grains separated from the lunar regolith. These mineral types are the basic components of lunar rocks. Mineral grains are loosened on the destruction and disintegration of rocks produced by meteoritic bombardment of the lunar surface. Erosion caused by micrometeoritic impacts and solar wind particles essentially affects the minerals exposed on the lunar surface: their shapes are changed and the original crystal faces are destroyed. Some crystallographic elements have been preserved only in a small number of grains (Figs. 51, 73).

Scarcely ever have the mineral grains a perfectly fresh, unchanged surface appearance. Lunar erosion gives rise to complicated surface textures of mineral grains, which are due particularly to low-velocity and high-velocity impacts. Microcraters varying in size (within the range of tenths to tens of μm) and in morphology are the dominant morphological features. Perfectly developed pits, rims and spall zones* occur in craters of larger than 10 μm diameter, which were produced by projectiles striking the target at right angles (Figs. 53–54). The projectile, however, usually

* The morphology of craters is described in detail in the further text, together with the characteristics of the surfaces of spheroidal particles (p. 29).

impacts the mineral surface obliquely and, consequently, the perfectly developed crater forms are very rare, as they are disturbed by chip surfaces along the mineral cleavage (Figs. 45, 57, 71). The morphology of craters is generally simple: a pit with slightly hummocky surface and occasionally with conchoidal fracture, enclosed by a small rim. The high-velocity impact craters have partially melted saucer-like pits and small, partly melted rims (Figs. 47, 63). The remaining morphological elements are usually imperfectly developed. The shape and morphology of mineral grains are also modified by additional shock features such as fractures and characteristic chip surfaces along the cleavage planes (Figs. 45, 49, 56, 83).

The surface of mineral grains is often diversified by linear structures (Figs. 49, 50), which are genetically associated with cleavage or twinning of minerals, or with impact deformations. Pronounced fine striation of some minerals (Figs. 66, 78, 84) may be produced by impact erosion or result from the internal structure of minerals; it may even be of induction character.

The cracks, which are a frequent negative surface feature, may be genetically associated with cleavage of minerals, but some of them traverse the mineral surface haphazardly, irrespective of cleavage (Fig. 55).

The positive relief forms are represented chiefly by fine regolith particles which were attached to the minerals when their surface was partly melted on impact (Fig. 55). The amount of attached particles may be an indicator of the length of exposure of mineral grains on the lunar surface: the longer the time of exposure, the higher the density of attached particles.

The degree of exogenic reworking of minerals may also be demonstrated by the amount of splashed silicate material on their surface. It forms irregularly-shaped drops, spherical particles or coatings (Figs. 60, 63, 75, 79). Some of these forms have a considerable amount of iron, which may be explained as an admixture of meteoritic material in the melt produced by meteoritic impact (Fig. 81).

The protruding parts of enclosed minerals (Fig. 72) can be classed with the positive surface elements as well.

SECONDARY ROCKS AND SECONDARY FORMATIONS

Breccias

The breccia samples studied are parts of larger breccia fragments. They are relatively brittle and composed of various regolith particles differing in size and shape.

The breccia fragments are generally of irregular but not complicated form. Particles of mild contours (Figs. 97, 99, 100) by far prevail over sharply bounded angular forms (Figs. 91, 93). Their surfaces are usually modified, rough and hummocky as a result of their internal structure. Impact deformations such as craters, dimples and pits can be distinctly seen on the surfaces of fragments. It has been

found that perfectly developed craters are scarcer on the breccias than on the crystalline fragments, probably because of their less firm structure. Micrometeoritic impacts are liable to cause the destruction of breccia fragments, and to produce microcraters on the surface of solid particles and glassy splashes (Fig. 89). The most frequent morphological element of the breccias are low-velocity forms, i.e. shallow craters of simple morphology, dimples and pits (Figs. 87, 88, 91). These impact elements show a wide range of dimensions.

Characteristic surface forms of breccia fragments are silicate splashes, often of vesicular texture (Figs. 91, 94, 98, 103). The contact between glass and breccia is usually sharp, which may suggest a relatively high viscosity of the silicate melt. Silicate splashes are almost invariably of high porosity, caused by the escape of gases from the cooling melt. The surface of breccia is frequently traversed by cracks, which may have been generated by even slight mechanical effect. Distinctive features are also pores and vugs (Figs. 97, 100).

An interesting feature observed on some breccia surfaces are linear striae (Fig. 99), which resemble slickensides, which are known from the fault zones on the Earth. The lunar striation can be assumed to have been formed by a similar mechanism: either by shifting of rocks due to meteoritic impacts or by slope movements.

Agglutinates

Agglutinates are regolith particles welded together into bodies of irregular shapes and diversified surface morphology. They were generated either by welding of regolith particles at places of surface melting caused by meteoritic impacts, or by cementation of regolith fines by silicate melt ejected at impacts. The mode of formation determines the peculiar, often bizarre shapes of agglutinates and their uneven, often hummocky surface (Figs. 105, 106, 111). Since they are derived directly from the regolith, they contain regolith particles of all types and dimensions (Fig. 110).

The agglutinates are relatively brittle, particularly those parts or types whose particles are welded only at the points of their contact or which are not compacted enough (Fig. 108). The parts or types of agglutinates which consist of regolith particles cemented by silicate melt are firmer, even if relatively brittle.

The surface of the agglutinates is not uniform: rough portions resulting from their aggregate structure alternate with smooth portions lined with vesicular glass (Fig. 112). These are covered with outgassing structures, craters and attached fine regolith particles (Figs. 105, 109). Hemispheric mounds are a characteristic surface feature of glass-coated agglutinates. They are up to 15 μm in diameter and often arranged into trains or other patterns (Figs. 113, 114). Forms of a similar type are composed mainly of metallic iron, with Ni, Co, S and P as possible admixtures. These hemispheric mounds may originate in three ways: (1) by a spray of melt or by condensation of gases which (both melt and gases) were produced by impact-produced melting

of lunar rocks; in this case they contain an admixture of Ni and Co; (2) by reduction of Fe-silicates by solar-wind hydrogen, in which case the mounds consist only of iron; (3) by incongruent melting of Fe-silicates and subsequent liquation and separation of the metallic melt; the metal is then pure iron.

It is of interest that the hemispheric mounds are embedded in the glassy host substrate (Fig. 112).

Glasses

The secondary glasses are the products of various impact events. Fragments of secondary glass occur in the lunar regolith in the form of splashes on the surface of all particle types (see above), and of spheroidal particles and angular fragments, as will be described in the text below.

The glass fragments show a great variety of shape. Irregularly-shaped, angular forms are most frequent (Figs. 115, 119). The angular contours of glass fragments are caused mainly by the sharp chip surfaces typical of isotropic glassy materials. Rounded fragments are rare, they have been observed only on those particles which during their long exposure on the lunar surface did not experience any intensive impacting and were only smoothed by solar wind ions (Fig. 116).

The most widespread morphological element on the glass particles are numerous chip surfaces formed on the deformation of brittle glass by low-velocity impacts (Figs. 115, 119, 121). They show a conchoidal fracture typical of glasses. Traces of the conchoidal fracture occur on virtually all low-velocity impact deformations (craters, pits), which are frequent on the glass fragments. High-velocity impact craters are also abundant and their morphological features are usually well developed (see pp. 30–31). Their origin is generally accompanied by partial or complete melting of the target material.

A characteristic surface form of glass fragments are uncovered cavities after enclosed gases. They show a regular rounded shape and are often filled with regolith dust (Figs. 120, 122). In isolated cases these cavities are fringed with a small pseudo-rim, the formation of which may be controlled by the morphology of the outer slope of the cavity (Fig. 121).

The relief of glassy fragments is often complicated by the attached fine regolith particles, which are unusually prominent on the smooth glass surface (Figs. 119, 121).

Of interest are minute (only a few μm) drop-like forms of hemispheric or ellipsoidal shape (Figs. 117, 118). Some drops conjoin to form bodies of irregular outline (Fig. 119). These drop-like forms indicate a low wettability of the host surface and are themselves without pores. They are of basaltic chemistry and their Fe content is higher than that of the glassy host fragment. Their origin is probably due to the impact of cooling silicate melt, whose temperature was too low for the melt to flow uniformly over the host surface, so that it dispersed into droplets of micron- and

even smaller size. However, the regular shape of the drops and the absence of pores on their surface indicate another plausible mode of their formation, i.e. by the condensation of an Fe-rich silicate vapor phase settling on the glass particle surface.

Glassy spheroidal particles

The glassy spheroidal particles constitute an insignificant portion of the lunar regolith, but they are a ubiquitous particular component of it. Their surface morphology is highly variable and invariably well-pronounced, which is due to the peculiar genesis of the glassy spherules and their isotropy and brittle nature. The surface of glassy spherules is usually smooth and even. The description and interpretation of the morphology of glassy spheroidal particles are the main objective of this study.

On the basis of the surface forms of the glassy spherules the elements of their microrelief were divided into two main groups: (a) the group of negative forms and (b) the group of positive forms (relative to the ideal surface of a regular sphere).

The most common negative surface elements are craters formed by meteoritic impacts. The detailed study of their morphology made it possible to divide the craters on the glassy surfaces into two types according to the mode of destruction of the host material: (1) the crush craters formed by mere fragmentation of the host material and (2) melted craters, which show visible traces of melting.

The crush craters (Fig. 129) are quite frequent on the surface of glassy particles but they are not a predominant morphological type. The morphological features are not developed with the same distinctness in all craters; their morphology can be satisfactorily recognized only by comparing a large number of forms. The following morphological forms may occur in the crush craters:

A small pit or hole in the center of the crater is probably a direct trace of the projectile impact. It is called the impact pit and is characterized by moderate slopes and uneven hummocky surface. The hummocky surface is the result of target crushing on the meteoritic impact. The depth : diameter ratio of the central pit varies, approximately between 1 : 4 and 1 : 6.

The second zone of conchoidal fracture is probably the product of predominant tangential stress. It is called the spall zone and consists of a group of relatively large conchs formed through spalling of glass flakes. The conchs adjoin the impact pit like a flower corolla.

As a result of the lens-like form of spall, an elevation develops between the first and the second zone, rimming the crater. Analogously to the normal meteoritic craters, the elevation is also termed a 'rim'. The individual segments ('petals') of the spall zone are separated by a system of radial ridges. If the latter are well developed, the spall zone has the appearance of circular segments fully separated from one another. The outer boundary of the spall zone is usually fairly well defined.

An exfoliation zone is another zone of disturbance which, if perfectly developed, forms a second spall zone, but it is usually distinguished only by exfoliation fractures. The glass flakes are somewhat uplifted at the outer margin of this zone, forming a 'pseudorim'. The pseudorim is slightly elevated above the original surface of glassy particles.

The characteristic ratio of the pit diameter to crater diameter in craters of this type ranges from 1 : 3 to 1 : 4.

The melted craters (Figs. 130–133) are composed of the same basic morphological elements as the crush craters. Their characteristic feature, however, is the partial melting of the pit and rim and frequently even of the peripheral zones. The individual morphological zones of the melted craters are usually very prominent. Central pits and the surrounding melted rims are generally distinctive; the latter make the morphological delimitation of pits more pronounced. Thin fibres of splashed melt occasionally radiate from the crater.

On the basis of morphological features, the melted craters are divided into two subtypes:

The first subtype (Figs. 130, 131) includes craters that have a melted pit and rim and fairly wide spall zone. This is not melted but shows conchoidal fracture analogously to that of the crush craters. The ratio of the pit diameter to the crater diameter varies between 1 : 2.5 and 1 : 3, being thus a little higher than with the crush craters. The boundary between the spall zone and the undisturbed particle surface is sharp and uneven. The craters of this subtype are usually accompanied by exfoliation fractures formed along the outer limit of the spall zone. They constitute an exfoliation zone.

The craters of second subtype (Figs. 132, 133) are characterized by partly melted pits, rims and even spall zones. The spall zone is usually characterized by radial ridges, emphasized by melted material, and by intervening depressions. The width of the spall zone is much smaller than with the first subtype. The zone of exfoliation is well defined, frequently representing the only annular structure. The pit : crater diameter ratio increases to 1 : 1.5.

It should be remarked that this division of craters into types and subtypes is rather conventional, and that there is a number of transitional types, ranging from shallow depressions to craters with deep melted pits.

The differences in the morphological structure of the craters reflect broadly the differences in the velocity of projectiles which produced them. The crush craters are obviously products of low-velocity impacts of both extralunar and lunar particles. The minimum velocity of extralunar particles impacting the Moon surface is estimated at 2.4 km . s^{-1}. Projectiles of the other type are mainly fragments of lunar rocks ejected from the craters at high-velocity impacts. The melted craters of the first and particularly the second subtype are produced by high-velocity impacts of the particles of extralunar – meteoritic or cometary – origin. It was proved experimentally

(Hörz H. et al., 1975) that impact pits melted at velocities of projectiles $\geqq 3$ km . s^{-1} and spall zones at a still higher velocity, i.e. $\geqq 5$ km . s^{-1}.

The above considerations seem to be valid only for craters formed on the surface of completely cooled hard particles. At high-velocity bombardment of hot surfaces, the craters showing traces of melting can be produced by the markedly lower projectile velocities than at impacting consolidated targets. This may occur on the collision of particles in an impact-produced cloud, when the not yet solidified silicate spherules meet hard regolith particles.

The surfaces of glassy particles are dotted not only by craters produced by high-energy exogenic agents but also by other negative forms of different origin, as, for example, the dimples. These are rather shallow rounded forms showing mild contours (Figs. 136, 139, 140). Their dimensions range from 1 to 15 μm and their morphology varies concurrently. Some dimples are surrounded by minor rims. The covered dimples are syngenetic with the glassy host particles; they were produced by gases which during cooling and consolidation of silicate melt accumulated in the subsurface layer. The presence of outgassing structures affects the overall morphology of the particles.

Cavities of various diameters and depths are characteristic features of many glassy spheroidal particles (Fig. 135). They are easy to identify since they almost invariably lack both rims and fracture zones. Their walls are steeper than those of crater pits and dimples. In the same way as the dimples, the cavities formed due to the escape of gases from the silicate melt during the cooling of host spherules, but the gas inclusions occurred in the interior of the host particles and not close to their surface. The presence of the cavities inside the spherules may be regarded as sufficient evidence of the formation of the latter from the melt and not by condensation.

Another surface element of glassy spheroidal particles are the vugs with uneven angular outlines and without any melting features (Figs. 131, 137). They are formed by the uncovering of gas-containing pores, which occur in already cooled spheroidal particles. The vugs are generally bordered with a light-colored halo of various width, which is clearly seen on the particle surface. The light-colored ring is a relict of the thin glassy skin, which closed the gas inclusion. The vugs are often filled with broken skin and regolith dust. A slight impact was probably sufficient for breaking through the hard and brittle silicate skin.

Figure 133 shows rather shallow small depressions, striae and grooves of various length, which are common on the glassy spherules. Their origin is probably a result of the collision of a not completely cooled spherical particle, still capable of plastic deformation, with harder particles of an impact debris cloud or of the regolith on the lunar surface.

The form illustrated in Fig. 138 is of particular interest. The rounded shape of the depression and of the mound at its bottom suggests that they formed in an incompletely cooled glassy spherule. Such surface features may be assumed to have formed on the collision of a glassy sphere with another particle at the moment when the

surface layer of the sphere was nearly cool but still plastic, and its interior was still liquid. On the collision the plastic surface layer was broken through and the liquid interior was exposed.

The surfaces of spheroidal particles also show some positive relief forms. The hummocky surface with numerous outgassing structures (Fig. 140) indicates that its morphology was moulded during the cooling of the glassy particle.

The predominant part of the glassy spherules bear abundant attached minute regolith particles (Figs. 123–126). In some cases the attached debris is concentrated mainly on one side of the sphere, which indicates that the attachment took place when the host sphere was still plastic on the surface but had already landed on the Moon. On the other hand, a random distribution of fine debris over the whole surface of the sphere suggests an in-flight collision in an impact-produced cloud.

A common surface feature of glassy spherules are splashes of silicate material, which congealed on their surface (Figs. 140, 142). The splashes are not always genetically related to the microcraters occurring on the given particle but are composed of material that is foreign to it. It should be noted that splashes may be composed of both silicate glass and metal. Their dimensions and shapes differ greatly.

Thread-like splashes which often occur close to melted craters formed from the melt ejected at impact (Fig. 131). They usually radiate from the crater. The thickness of the threads ranges from tenths of μm to a few μm and their length does not generally exceed the width of the crater.

Like splashes, not all thread-like structures are associated with the craters; in this case they constitute a system of relatively long parallel threads, which often transect each other at different angles (Fig. 141).

Minute hemispherical mounds and spheres (10 μm in diameter max.) are a characteristic surface form of glassy spherules. They may be arranged into trains or various other patterns (Figs. 143–148). The morphology, genesis and chemistry of these mounds have been discussed in the description of agglutinates (see pp. 27, 28).

Some glassy spheroidal particles are partly covered with semilucid coatings of silicate composition (Fig. 147), which very likely were produced by condensation of the silicate gas phase.

The above description shows that the glassy spheroidal particles are distinguished by a composite surface relief, which reflects the complexity of their geological history.

Some of the surface elements are genetically associated with the internal processes active at the melting of the material and its subsequent cooling and solidification into glass spherules. Dimples and cavities formed on the escape of gases from the silicate melt are of this type. Other both negative and positive relief forms, such as impressions of regolith particles, compound depressions and attached particles, come into being during the cooling of plastic spherules by the action of exogenic agents which have no relation to the generation of the particle itself.

A considerable part of the surface features form only on the completely cooled glass spherules as, for example, craters of diverse types, splashes and linear thread-like

forms and mounds. These features are mainly and directly linked with the alterations produced by intensive meteoritic bombardment of the lunar surface. The processes involved are crushing, melting, splashing, spraying, vaporization, condensation and liquation.

METALLIC PARTICLES AND INCLUSIONS

Metallic particles are present in the lunar regolith as (1) inclusions in fragments of magmatic rocks; (2) finely dispersed particles generated by reduction processes from Fe-silicates and Fe-glasses as a result of shock and thermal metamorphism; (3) euhedral crystals of metallic iron, which were produced in pores by crystallization from the gas phase in magmatic and recrystallized and remelted rocks; and (4) inclusions in the secondary rocks or free-standing particles of meteoritic composition. This last form is widely distributed on the lunar surface and will be dealt with in more detail in the further text.

The metallic particles of meteoritic composition (Fe : Ni ratio = 20 : 1 and less, Co content about 0.5 wt %) are produced by melting of meteorites at their impacts on the lunar surface. Their mode of formation controls their dominantly spherical shape; they occur as regular spherules or pear-like forms and rather rarely as irregular angular forms. The spherical forms (1 mm and less in diameter) show subrounded shape and relatively simple surface. The shapes of larger particles are not so regular; they are often pyriform, and their surface structure is very complicated and heterogeneous.

The surface of metallic spherules less than 1 mm across is characterized by impact deformations (Figs. 151, 162), cracks produced by cooling of the metallic material (Fig. 162), grooves and striae formed in an impact-generated cloud or eroded by fine regolith particles (Figs. 151, 162), i.e. by the surface features that are also widespread on the regolith particles of other types. The morphology of larger particles is complex and particular. Figures 153–160 show parts of the surface of a pyriform metallic particle, 4.4 × 5.5 mm in size (Fig. 153). The greater part of the particle surface has a globular structure; the individual metal globules (100–200 μm in size) are welded together, giving the surface a hummocky relief (Figs. 154, 155). The undulated relief of other parts shows traces of flowing metallic material (Fig. 159). The part with mosaic relief shown in Fig. 160 is of special interest.

The heterogeneous surface of the metallic particle described expresses its complicated genesis and internal structure. The pyriform shape of the particle suggests its formation from a drop of melt of the meteoritic composition. Tiny metallic spherules on the host particle were attached when still plastic or liquid. In the latter case they may be products of the splashed material of meteoritic origin or of the condensation of the impact-generated vapor phase.

The formation of a metallic particle was accompanied by the origin of pores and hollows in its interior. Morphological characteristics of the depression shown in Fig. 156 indicate that it is a gas cavity: its strikingly circular shape, and the absence of a rim or steep walls. Tiny elliptical formations concentrated around the hollow shown in Figs. 157 and 158 resulted from aggregation of small globules where they did not touch each other.

The cooled and solidified particle was exposed to frequent impacts. A high-velocity impact crater with typical morphology of craters in metals is seen in Fig. 154. The considerable depth of the central pit is characteristic. The ratio of the pit depth to the crater diameter is about 1 : 1.5. The morphology of the rim is quite specific: the lip is narrow and the outer part is discontinuous, and as if turned inwards in places.

Metal fragments of meteoritic composition occur in the lunar regolith in the form of fairly large inclusions in secondary rocks, usually in breccias (Figs. 161, 162). The metal which had been melted during meteoritic impacts fell on the crumbled layer of fine-grained regolith and was subsequently incorporated into the fragments of secondary rocks during the metamorphic alterations of the regolith.

Some metallic inclusions show prominent growth steps on their surface (Figs. 163, 164), which may have formed only under suitable conditions, i.e. when free space was available. These metal features (growth steps) have been established in the pores of highland rock fragments of anorthositic type.

CONCLUSION

GENETIC INTERPRETATION OF THE SURFACE MORPHOLOGY OF LUNAR REGOLITH PARTICLES

Scanning electron microscopy enabled the surface morphology of lunar regolith particles to be studied in detail. Its thorough examination contributed to the recognition of the principal processes that led to the origin and evolution of the regolith.

The analyses of forms, surfaces and structures of the basic particle types have shown that the structure of the particles and for the most part also their surface forms were produced by impact processes of both the primary (meteoritic) and secondary types. The impact-produced fragmentation of lunar rocks gives rise to the clastic regolith material, i.e. fragments of magmatic rocks and mineral grains. The impact processes are also responsible for the formation of secondary regolith particles – breccias, secondary glasses, glassy spherules and agglutinates. The lunar spherules and agglutinates are specific types, which do not occur in terrestrial conditions. The glassy spheroidal particles represent drops of melted lunar material ejected by meteoritic impacts. The form and surface morphology of the spherules (Figs. 123 to 150) reflect their genesis and subsequent exogenic history. The agglutinates are aggregates of particles or their fragments formed, as can be inferred from their microstructure, either by welding of regolith grains melted on the surface due to meteoritic impacts (Fig.106), or by cementation of regolith fines by drops of impact-produced silicate melt (Fig. 105). The consolidation of grains into an agglutinate particle occurs under the influence of intense heating, which produces strong vitrification of individual components.

The study of the microstructure of agglutinates has shown that they are fairly brittle and easy to break. Their strength is far lower than that of breccias, whose clasts are more densely packed (Figs. 95, 96 and 108, 110). The breccias also form by cementation of regolith grains but at a far lower impact-produced heat, as is evidenced by slighter melting of the clasts.

The original form and structural features of the regolith particle surfaces are controlled by their genesis. Fresh fragments of magmatic rocks display characteristic angular outlines. Their surface configuration depends on the structure and nature of the rock-forming minerals (Figs. 9, 10, 13, 14, 23, 24). Fresh mineral grains are distinguished by typical shapes (Figs. 49, 61) and primary crystal faces (Fig. 51). The surface of slightly altered breccias is rough and hummocky, which is bound up

closely with their texture (Fig. 100). The bizarre shapes of agglutinates and the overall character of their surface (Fig. 111) are determined by their origin. The shape of spheroidal particles also shows evidence of their genesis (Figs. 123, 127).

The original forms and characters of the regolith particle surfaces experienced considerable changes during later geological history. They were exposed to the effects of lunar exogenic factors, particularly of impact events of various scales.

The most widely distributed impact forms visible on the surfaces of virtually all regolith particles are impact depressions: chip surfaces, pits and craters. Their morphology is controlled mainly by the impact energy and the properties of the target material.

Low-velocity impacts predominantly produce chip surfaces and pits on the particle surface. These deformations are characterized on glassy surfaces by prominent conchoidal fracture, typical of glasses (Figs. 116, 121), whilst on crystalline forms they usually adapt themselves to their texture and crystal structure. In the latter case the chip surfaces are uneven and rough, reflecting the granularity of the rock (Figs. 23, 30). Chip surfaces on mineral grains commonly display step-like surfaces following the cleavage planes (Figs. 46, 56).

The crystalline structure of rock fragments and mineral grains affect the morphology of low-velocity craters in a similar way: The impact pits often lack a regular rounded form and their surface is slightly hummocky, and the spall zone is not always perfectly developed. Its irregular form is governed by the crystal structure and boundaries of individual minerals (Figs. 5, 24, 57). Low-velocity craters on brittle and isotropic glassy targets show well developed and defined morphological elements: pits of saucer form, sharply demarcated rims and spall zones, which are usually circular and concentric with the impact pit (Fig. 129). The spall zone is occasionally adjoined by an incompletely developed exfoliation zone. All morphological elements of low-velocity craters on glasses are distinguished by conchoidal fracture of their surfaces.

The morphology of craters produced by high-velocity impacts accompanied by melting of material is influenced by the properties of the target to a minor extent. The craters generated by high-velocity projectiles invariably consist of a partly melted circular pit and a partly melted rim (Figs. 19, 33, 131). Craters of 1 μm and more in diameter often possess well developed, partly melted spall zone, concentric with the pit (Figs. 54, 132). The degree of maturity of the spall zone rises with the crater diameter.

It should be remarked that there is a wide spectrum of transitional crater forms showing features of both the low-velocity and high-velocity craters (Fig. 130).

The regolith particles on the lunar surface are exposed continuously to impact effects. The impact energy controls the degree of alteration of the particle surfaces. The finest components of meteorites and solar wind ions constantly rework the particle forms. On the one hand they smooth out their outlines (Figs. 62, 116) and on the other they make their microtopography more complicated by producing fine

linear features (Fig. 77) and fine cracks along cleavage planes (Fig. 79). The higher-energy impacts give rise to chip surfaces, craters and large fractures. High-energy impacts cause shift deformations in crystal lattices (Fig. 68), which are accompanied by marked changes perceptible on particle surfaces.

The occurrence of silicate splashes is due to the impact-generated melting of lunar rocks (Figs. 80, 98). The splashes usually show irregular, diffuse contours and are highly porous; the porosity is associated with degassing of the melt. The shapes of splashes and the character of their contact with the surface of host particles depend on the temperature of the melt. Hot melt easily flows down the host surface (Figs. 105, 141), whilst the cooling melt wets the particle only slightly or not at all (Figs. 58, 64). The contact between a splash and host particle is sharp. On the wetted surface of the particle the splashed material may disperse into tiny drops, which then solidify into spheroidal particles (Fig. 118). The melt splashes may form spherical particles on the surface of substrate (Fig. 16).

The impact events indirectly influence the origin of new formations in the lunar regolith, such as products of condensation of the vapor phase (on sufficiently strong meteoritic explosions) or of impact-generated remelting and recrystallization of the lunar material. One of the most widespread new formations of this type are spherical and hemispherical iron mounds, some of them with an admixture of Ni, Co, S and P. They are of very small dimensions, most commonly below 1 μm, and occur particularly on the surfaces of not completely remelted spherules and of splashes of impact-melted material (Figs. 114, 146). Judging from their morphology, the hemispheres are halves of spherical particles rising above the surface of the host; the second half is embedded in the host particle. The character of their embedding suggests that they originated most likely as a result of liquation. However, they could also have formed by condensation at high-intensity impacts, or by reduction of lunar Fe-silicates by solar wind hydrogen, and subsequent growth of metallic products due to impact melting.

Of interest are the crystals of minerals (iron and silicates – plagioclase, pyroxene, olivine) found in the cavities of magmatic rock fragments and breccias (Fig. 12). These formations are not frequent in the fragments studied, but they were fairly abundant in larger cavities of large rock fragments collected by Apollo missions. These phases (especially Fe) may also be regarded as products of condensation of the material vaporized on meteoritic impacts. It is not excluded, however, that the final stages of magmatic process may contribute to their formation (particularly of silicates) by recrystallization of rock-forming minerals in the rock pores due to the action of gas component.

Stony and iron meteorites permanently act on the lunar regolith. All regolith samples contain particles of metallic iron of meteoritic composition. The relics of stony meteorites, making up a major part of meteoritic material falling on the lunar surface, were found in the regolith samples in a very small amount, probably because of their being difficult to identify. The meteoritic metal is represented mainly

by iron-nickel alloys (kamacite and taenite); it is most common particularly in the fragments of secondary rocks as spheroidal, drop-like and rarely irregular particles.

The overall morphology of the lunar metallic and silicate particles is governed by their composition, texture and conditions of their origin. The formation of the secondary surface elements also depends on the effectiveness and character of the activity of exogenic factors. The morphology of the metallic particles differs markedly from that of the silicate fragments because of their plasticity, which affects even the character of deformations of the metallic particles (Figs. 152, 155).

The surface morphology of metallic particles may be related to their diameters. The surface of small metallic particles (up to 1 μm in diameter) is relatively simple. The smooth surface developed during the cooling of the melt and cut across by contraction fissures displays various exogenic features, such as impact deformations, grooves, striae and scratches, which were produced due to erosion by fine particles of an impact-generated cloud and of the regolith.

The surfaces of larger spheroidal particles are more complex, reflecting their more complicated internal structure. According to special mineralogical study, the metallic particles in Fig. 153 are composed of kamacite, schreibersite and troilite with chromite, taenite and silicate inclusions. Troilite forms relatively large segregations (cemented by eutectic kamacite-phosphide mixture) in the sectors formed of kamacite. Chromite and taenite associate troilite. Accumulations of silicates are seen on the surface of the host particle.

The surface of the host particle shows a globular texture, which is particularly pronounced in the peripheral parts (Fig. 154). It reflects the internal structure of the particle. The globules of 100–200 μm in diameter are cemented by eutectic kamacite-phosphide mixture, the structure of which is expressed by a complicated mosaic surface of the particle (Fig. 160). Part of the particle has an undulated surface bearing traces of fluidal structure of the material (Fig. 158). The morphology of these surface formations, like that of the craters on metals, shows up the plastic properties of the metal (Fig. 155).

The investigations of the surface morphology of lunar particles have shown that the motive power of the evolution of the regolith are the impact processes, the products of which occur practically on all particles. They are represented by ubiquitous specific particle types (agglutinates, silicate spherules), impact forms and new formations. No reliable evidence of any other processes involved in the formation and evolution of the regolith have so far been reported. In any case, no features have been found on the particle surfaces that indicate their pyroclastic origin and are known form the volcanic ashes on the Earth.

The impact processes induce alterations not only in the physical properties of the regolith (fragmentation of lunar rocks and agglomeration of fine grains into secondary particles) and of its component parts (formation of various surficial impact features) but also in the chemical characteristics of the regolith (origin of new formations).

The degree of erosion of the regolith particle surfaces, i.e. the amount of morphological forms complicating their original topography, is an important characteristic reflecting the maturity of the regolith. The particles showing surface changes of various degrees provide evidence that the regolith evolves gradually.

Consequently, the study of the surface morphology of regolith particles has revealed the evolution trend of the regolith and contributed to the recognition of the principal factors responsible for this development history.

SUMMARY

The morphology of lunar regolith particles sampled by the Soviet Luna 16 and Luna 20 automatic probes was studied using a scanning electron microscope. Both primary and secondary rock components of the regolith were examined. The former are represented by rock fragments of basaltic and gabbroid types (characteristic of mare regions), fragments of metamorphosed highland rocks of the ANT suite, and by mineral grains. The latter comprise fragments of exogenic origin, i.e. breccias, agglutinates, glasses and glassy spheroidal particles. The surfaces of free-standing metallic particles, metallic inclusions in rock fragments and of newly formed minerals produced by exogenic processes have also been the subject of our study. The surface morphology of lunar regolith particles is shown in 164 photographs.

The principal factors controlling the formation of the regolith fragment morphology are exogenic processes of impact-explosive character, related to the bombardment of the lunar surface by meteoritic and micrometeoritic particles. No indications of the pyroclastic origin of regolith particles have been found. Metamorphism, (cataclasis and recrystallization), fragmentation and displacement of clastic material, agglomeration of fragments, melting, evaporation and condensation processes occur as a result of intensive meteoritic bombardment of the lunar surface and are reflected directly or indirectly in the morphology of lunar particles. Meteoritic bombardment gives rise not only to physical but also to chemical alterations of lunar rocks.

Destruction of regolith particles greatly affects their morphology. The fragments whose morphology is bound up mainly with solidification and crystallization of minor portions of melt (predominantly glassy and metallic particles) are rarer. The chip surfaces of crystalline fragments are determined by their texture and cleavage of rock-forming minerals, since the rock fragments are commonly disrupted along the contacts or cleavage planes of their minerals. Where cleavage is absent, the chip surfaces are of conchoidal nature, which is most characteristic of glass fragments. The surface formed during solidification of the melts is either even and smooth (on glassy particles) or reflects the internal structure of the material (on some particles of metallic iron).

The remaining morphological elements, though widespread, do not differ greatly in local character. They usually occur on the chip surfaces or on the surfaces of solidified melts. This group includes spalling, pits, microcraters, pores – outgassing voids, cracks, striae, grooves and scratches, splashes of silicate melt, hemispherical mounds, growth steps of minerals, inductive surfaces and others.

The chip surfaces and pits are produced by low-velocity micrometeoritic impacts. When developed on the surface of crystalline fragments, their morphology is commonly governed by the structure of rock-forming minerals and the relief surfaces usually follow the boundaries or cleavage planes of mineral grains.

Microcraters are common surface elements of the regolith particles of all types. Their morphology is related to the internal structure of the target and to the projectile velocity. The low-velocity craters on the surfaces of crystalline fragments are distinguished by the following features: The impact pit often lacks a regular rounded shape and shows a slightly hummocky relief; the spall zone is generally discontinuous and of irregular form, which is determined by the rock texture and grain boundaries. The low-velocity craters on isotropic glassy targets show well-developed morphological elements: a saucer-like central pit and well-defined rim and spall zone, which may be adjoined by an exfoliation zone characterized by fractures. The properties of a target influence the morphology of craters produced by high-velocity impacts (accompanied by melting of target material) to a far lesser degree. The craters due to high-velocity impacts, independent of the target composition, invariably possess the basic morphological elements, i.e. a partially melted rounded pit and a partly melted rim. The craters larger than 1 μm in diameter frequently display a well-developed, often partly melted spall zone, concentric with the central pit. The degree of maturity of the spall zone increases with the size of the crater.

The outgassing voids are pores that were originally filled with gases and subsequently uncovered as a result of impact erosion. They are characterized by a regular rounded shape and even, smooth surface, and are most common on the surface of glassy particles and agglutinates.

Cracks and fractures are widespread on the regolith particle surfaces. Their formation is due to the reduction in the volume of material during crystallization of the melts, or to various mechanical deformations. Deformation fractures in crystalline fragments follow the boundaries or cleavage planes of mineral grains. The cracks on isotropic glassy surfaces produced by local impacts show radial and concentric arrangements. Other linear morphological features such as grooves, striae and scratches may be produced by the collision of particles in an impact-explosive cloud or during the displacement of regolith material by slope processes or meteoritic impacts.

The impact events are also responsible for an abundant occurrence of splashes. The splashes, which are the products of impact melting of lunar rocks, have irregular outlines and high porosity due to degassing of the melt. The shape of splashes and the character of their contacts with the particles depend on the temperature of the melt. A hot melt readily wets the surface of the substrate and spreads over it, whilst the cooling melt wets the substrate only slightly or not at all.

The formation of various new minerals can also be ascribed to the indirect influence of impact-explosive processes. The newly formed minerals are products of gas condensation or of impact-produced remelting and recrystallization of lunar

material. These new formations are represented on the regolith particle surface mainly by spherical and hemispherical bodies of silicate or metallic (Fe) composition. They are most frequent on the surface of glassy spherules or of silicate coatings produced by impact processes. The origin of minute crystals of metallic iron and silicates, which were discovered in some particles, may be connected with exogenic processes.

No mineral crystals bounded by well-defined crystal faces have been found in the material studied. Only sporadically have individual crystallographic elements been identified, on which growth steps and inductive surfaces have been distinguished.

The resulting overall morphology of the lunar regolith particles is related to their chemical and mineralogical composition, texture and conditions of their origin and to the intensity and character of exogenic factors. In this connection, study of the morphology of regolith particles is of importance for the understanding of the intensity, character and the role of impact-explosive processes in the geological history of the Moon.

ВВЕДЕНИЕ

ЛУННЫЙ РЕГОЛИТ, ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Лунный грунт – реголит – представляет собой рыхлый покров разнозернистого обломочного материала, включающий камни и обломки любых размеров, смещенные с места своего первоначального залегания.

Лунный реголит в целом является разнозернистой, темносерой (почти черной) или серой на морях и светлосерой на материках полиминеральной смесью, сложенной мелкими фрагментами кристаллических пород, отдельными зернами и их обломками, спекшимися и брекчированными агломератами, оплавленными и ошлакованными частицами. Средний медианный размер частиц реголита (фракция менее 1 мм) в целом определяется степенью его экзогенной переработанности и обычно находится в интервале от 60 до несколько более 100 мкм.

В составе реголита можно выделить две основные группы частиц – первичные и вторичные. Группу первичных частиц составляют обломки коренных магматических и метаморфических лунных пород из морских и материковых районов, а также многочисленные мономинеральные зерна. К группе вторичных частиц относится материал, подвергшийся существенному экзогенному преобразованию на поверхности Луны, – вторично литифицированные, уплотненные фрагменты брекчий, включающие мелкие частицы реголита, стекловатые зерна, в различной степени расплавленные или оплавленные с поверхности, а также спекшиеся и ошлакованные агрегаты – агглютинаты.

Основная часть первичных магматических пород морского реголита представлена мелкозернистыми меланократовыми ферробазальтами – плотными остроугольными обломками мелкозернистых базальтов темносерого цвета, включающими в качестве основных минеральных компонентов плагиоклаз, пироксен, оливин и ильменит. Некоторую часть магматических пород морских равнин составляют остроугольные фрагменты микрогаббро преимущественно желтовато-буроватых тонов с характерным размером зерен от 0,3 до 0,5 мм. Для микрогаббро характерны те же основные породообразующие минералы, что и для мелкокристаллических базальтов.

В материковом реголите первичные магматические породы встречаются очень редко. Основная часть материковых пород представлена ударнометаморфизованными брекчиями, сложенными плагиоклазом (преимущественно),

пироксеном и оливином; реже присутствуют минералы группы шпинели и ильменит. По химическому составу материковые породы соответствуют породам анортозитового ряда и неморским базальтам, обогащенным относительно морских аналогов глиноземом.

Основные породообразующие минералы лунных пород — плагиоклаз, пироксен, оливин, ильменит — присутствуют в лунном реголите не только в составе фрагментов пород, но и как отдельные зерна.

Наиболее распространенным минералом является плагиоклаз. На поверхностях прозрачных, очень чистых пластинок плагиоклаза материкового реголита, часто являющихся плоскостями спайности, хорошо заметны двойниковые швы. В морском реголите зерна плагиоклаза часто замутненные, иногда молочно-белые, эффект двойникования выражен слабее.

Пироксены лунного реголита представлены моноклинными и ромбическими разностями. Красновато-коричневые моноклинные пироксены характерны для морского грунта. Напротив, прозрачные слабо окрашенные в зеленовато-желтоватые тона ромбические пироксены более типичны для материкового реголита.

Оливин часто встречается как в морском, так и в материковом реголите в виде хорошо сохранившихся желтых или желтовато-коричневатых, часто прозрачных, зерен неправильной формы. Зерна оливина из образцов морского реголита содержат включения рудных минералов.

В реголите морских бассейнов весьма распространен ильменит; в материковом реголите ильменит встречается не часто. Изредка в образцах присутствуют обломки розовой шпинели.

Вторичные частицы являются генетически важной составляющей лунного реголита. Их природа в значительной степени отражает направление экзогенных процессов, происходящих на поверхности Луны и формирующих реголит.

Одним из основных компонентов лунного реголита являются обломки реголитовых брекчий, которые имеют в общем серый цвет (светлосерый на материках и более темный на морях) и характеризуются, как правило, округлой, сглаженной формой. Их происхождение обусловлено процессами местного уплотнения и ударной литификации мелкораздробленного материала реголита, на что указывает общий литологический состав включенных в брекчию обломков и присутствие в них большого количества фрагментов вторичного стекла. Основными процессами, вызывающими литификацию, мы считаем диффузию и частичное плавление на контактах зерен, а затем спекание в условиях вакуума.

Интересным типом вторичных частиц лунного реголита, не характерным для земных образований, являются агглютинаты — рыхлые, темносерые в морском реголите и более светлые в материковом индивидуальные частицы сложной, ветвистой формы, состоящие из спекшихся зерен лунного грунта. Аналогично брекчиям, агглютинаты содержат все компоненты мелкораздробленного вещества реголита, однако отличаются более высоким содержанием

стекла. Процесс образования этих агрегатов связан с оплавлением и спеканием компонентов самого поверхностного рыхлого слоя реголита при микрометеоритных ударах.

Весьма характерным вторичным образованием лунного реголита является вторичное стекло, которое присутствует в реголите в виде набрызгов на поверхности частиц, а также в виде различного цвета обломков стекол и стеклянных сфероидальных частиц, для краткости в дальнейшем именуемых „сферическими". Стеклянные сферические образования представляют собой специфический компонент лунного реголита. Их происхождение, подобно происхождению набрызгов стекла на поверхности частиц реголита, связано с метеоритными ударами, вызывающими плавление лунных пород и разбрызгивание силикатного расплава, капли которого, застывая в полете, образуют стеклянные частицы сферической формы.

Интересным типом частиц лунного реголита являются частицы металлического железа, присутствующие как в виде фрагментов неправильной формы, так и в виде сферических частиц. Исследования показали, что некоторым из этих частиц с уверенностью может быть приписано метеоритное происхождение. Другая часть, вероятно, представляет собой обломки магматогенного металлического железа, включенного в базальтовые породы.

Общее представление о количественных соотношениях различных типов частиц в образцах реголита дает приведенная ниже таблица.

Ведущим фактором в формировании реголита как горной породы является интенсивная бомбардировка поверхности Луны метеоритами и микрометеоритами. Ударно-взрывные явления, вызванные падением метеоритных тел, обусловливают разрушение и размельчение поверхностных пород Луны и выброс разрушенного вещества из образующейся ударной воронки. В течение всей геологической истории Луны происходит постоянная переработка реголита ударно-взрывными процессами, вертикальное перемешивание и горизонтальный перенос составляющих его частиц. Не исключено, что некоторую роль в образовании рыхлого поверхностного слоя Луны сыграли также эндогенные – вулканические – процессы, сопровождающиеся эксплозивными взрывами, дроблением и размельчением эффузивного материала. Вероятно, на дезинтеграцию лунных пород оказывают влияние и суточные колебания температуры на поверхности Луны, амплитуда которых достигает 250 – 300 °C.

Однако формирование реголита происходит под воздействием не только процесса разрушения и размельчения лунных пород, но и процессов агрегирования отдельных частиц лунного реголита. Одним из факторов, способствующих этому процессу, являются ударно-взрывные процессы. Брызги расплавленного при ударах материала, падая на лунную поверхность, цементируют некоторую часть мелких частиц, образуя агрегаты. Часть агрегатов возникает вследствие точечного приплавления отдельных зерен друг к другу в результате частичного поверхностного плавления отдельных зерен реголита в момент

локального ударного нагрева на поверхности Луны в условиях вакуума. Вероятно, агрегированию частиц может способствовать их электризация и способность легко слипаться в отдельные комочки. Роль агрегационных процессов возрастает с уменьшением размера частиц и увеличением экспозиционного возраста поверхности реголита.

Относительное содержание в реголите вторичных частиц (агглютинатов и вторичного стекла) является показателем его зрелости: количество вторичных частиц возрастает с увеличением экспозиционного возраста реголита и степени его переработанности.

Рассмотрение соотношения частиц разных типов в образцах реголита из разных районов Луны (смотри таблицу) показывает, что в составе морского реголита, доставленного „Луной-16", заметно преобладают вторичные частицы: брекчии, агглютинаты, реголитовые стекла. С другой стороны, образец грунта, доставленный „Луной-20", отличается значительно большим относительным содержанием фрагментов коренных пород и меньшей распространенностью вторичных частиц. Относительно невысокое содержание вторичного материала в грунте „Луны-20" указывает на заметно меньшую его переработанность и, следовательно, на относительно меньший экспозиционный возраст реголита в районе посадки „Луны-20".

Распространенность частиц различных типов в крупных фракциях образцов реголита из морского („Луна-16") и материкового („Луна-20") районов Луны (числовые проценты)

Типы частиц	+0,9 мм	−0,9 + 0,45 мм
„Луна-16"		
Породы типа микрогаббро	15,8	13,8
Базальты морские	8,7	7,7
Материковые породы анортозитового типа	0,8	3,4
Минеральные зерна и стекла	4,5	4,6
Брекчии реголитовые	45,0	34,2
Агглютинаты	24,2	34,8
Шарики стеклянные	1,0	1,5
„Луна-20"		
Породы типа микрогаббро	2,9	1,3
Материковые породы анортозитового типа	61,3	52,8
Минеральные зерна и стекла	1,1	9,6
Брекчии реголитовые	20,0	17,6
Агглютинаты	14,7	18,3
Шарики стеклянные	—	0,4

Наблюдаемое в образце „Луны-20“ соотношение частиц не характеризует возраст материкового реголита. Возраст материков древнее возраста морей. Вероятно, на свойства и состав реголита в районе посадки „Луны-20“ определенное влияние оказали геоморфологические условия места посадки – внешний склон вала кратера Амегино. Формирование реголита на наклонных поверхностях сопровождается направленным сносом обломочного материала вниз по склону и обновлением склонового материала, что постоянно сокращает экспозиционный возраст склонового реголита.

Исследование характера поверхности частиц, входящих в состав лунного реголита, может дать важную информацию о процессах преобразования эндогенных лунных пород и их изменения на поверхности Луны под воздействием комплекса факторов экзогенной переработки.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Изучение поверхности частиц лунного грунта проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-2 (фирма Jeol) и прибора JXA-50A (фирма Jeol), сочетающего в себе сканирующий электронный микроскоп и рентгеновский микроанализатор.

В основу работы сканирующего электронного устройства положен телевизионный принцип сканирования тонкого пучка электронов по поверхности объекта исследования.

В результате сканирования на экране прибора возникает увеличенное изображение исследуемого объекта с большой глубиной резкости. Увеличение сканирующих электронных микроскопов (СЭМов) определяется соотношением амплитуд развертки луча по экрану кинескопа и по объекту.

Принципиальное устройство и технические возможности СЭМов допускают:

1. исследование образцов относительно крупных размеров (глубина резкости в СЭМах примерно на два порядка выше, чем в оптических микроскопах);
2. исследование объекта с ненарушенным сложением и без особой предварительной обработки (кроме напыления тонким слоем углерода или золота);
3. съемку образца без его разрушения током электронного пучка, сканирующего по объекту и имеющего очень небольшую величину ($10^{-10} - 10^{-12}$ А), не вызывающую существенного нагревания (не выше 100 °С) и какого-то ни было изменения объекта.

Метод СЭМ нашел широкое применение в геологических исследованиях. Использование СЭМов позволяет наглядно представить геометрию объекта, характер его микросложения в ненарушенном состоянии, скульптуру его поверхности, т. е. те параметры, которые содержат ценную информацию о геологической истории объекта.

Для выяснения химического состава исследуемых частиц, а также отдельных морфологических элементов на их поверхности прибор JXA-50A был использован как рентгеновский микроанализатор. Прибор имеет три рентгеновских спектрометра, позволяющих определять химические элементы от бора до урана. Электрические импульсы, инициированные рентгеновским излучением, передаются в виде точек на экран прибора и воссоздают картину распределения определенных элементов на поверхности образца. Плотность точек пропорциональна содержанию исследуемого химического элемента. Величина разрешения на рентгеновской картине достигает 1 мкм, что позволяет опре-

делить присутствие тех или иных химических элементов в образцах очень малого размера. Использование эталонных образцов известого состава дает возможность на основании отношения интенсивностей определить весовые концентрации элементов в исследуемом объекте. Следует, однако, отметить, что точные количественные анализы возможны только для полированных поверхностей. При работе с неровной поверхностью можно получить лишь ее качественный или, в случае относительно ровной поверхности, полуколичественный химический состав, т. к. от шероховатости рельефа частиц зависит интенсивность регистрируемого рентгеновского излучения.

Методика подготовки геологических объектов к исследованию методом СЭМ и последующему изучению (в случае необходимости) их химического состава на рентгеносвском микроанализаторе довольно проста. После отбора образцов для исследования, промывания их в ацетоне и первичного изучения при небольших увеличениях (до 60×) с использованием микроскопов МБС-2 и МПС-2, образцы наносили препарировальной иглой на клейкую ленту (КЛТ-2), которую электропроводящим клеем прикрепляли к поверхности рабочего столбика. Геологические объекты являются, как правило, диэлектриками, поэтому для снятия заряда от электронного луча, сканирующего для получения изображения, образец перед съемкой напыляли в вакуумной камере тонким слоем (100 – 200 Å) проводящего материала, для чего чаще всего использовали золото, обеспечивающее контрастное изображение поверхности объекта. В случае, если поверхность образца отличалась очень сложным рельефом, трудно было получить непрерывный слой золота, поэтому образец перед напылением золотом напыляли тонким слоем углерода (100 Å), который хорошо внедряется в поры и полости и отличается хорошей электропроводностью. Искажения, обусловленные двойным напылением, несущественны до увеличения нескольких десятков тысяч.

Съемки поверхности частиц реголита проводили в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 25 кв на приборе JSM-2 и 15 – 20 кв на приборе JXA-50A при увеличениях в диапазоне от 20× до 30 000×. Размеры отобранных образцов находились в интервале 0,12—2,0 мм.

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Микроморфология частиц и фрагментов горных пород лунного реголита несет важную информацию как об их происхождении, так и об их последующей геологической истории, формирующейся под влиянием всего многообразия процессов, происходящих на поверхности Луны. Настоящая глава посвящена описанию форм поверхности основных типов частиц лунного реголита (образцы „Луны-16" и „Луны-20"), изучение которых проводилось методом растровой электронной микроскопии с применением рентгеноспектрального микроанализатора.

ПЕРВИЧНЫЕ МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ ЗЕРНА

Породы базальтового типа

Фрагменты лунных базальтов как морского, так и материкового происхождения являются одним из основных компонентов лунного реголита, в котором они чаще всего присутствуют в виде угловатых обломков неправильной формы (рис. 9). Относительно мягкие очертания свойственны лишь зернам, пережившим длительную экзогенную обработку (рис. 1). Поверхность базальтовых фрагментов, связанная с их мелкозернистой структурой и особенностями поверхности слагающих базальты минеральных зерен, отличается в целом значительной шероховатостью и носит часто мелкобугорчатый характер (рис. 6).

Процессы формирования лунного реголита в существенной мере определяют общую скульптуру поверхности базальтовых фрагментов, весьма распространенными формами которой являются ударные дефекты — кратеры и выбоины (рис. 1, 2, 3, 5, 8, 10), Кратеры – это депрессии высокоскоростного или низкоскоростного ударного генезиса в общем округлой формы, имеющие на полизернистой поверхности, как правило, два развитых морфологических элемента – ударную воронку и окружающий ее вал*, которые при высокоскоростном ударе несут следы оплавления. Зернистость кристаллических пород не позволяет выявить структуру ударного кратера с такой четкостью, которая проявляется

* Здесь мы используем терминологию, принятую при описании классических разрезов ударных кратеров.

на изотропных стеклянных частицах (см. стр. 56). Наблюдаемые на поверхности базальтовых фрагментов кратеры характеризуются широким диапазоном размеров – от первых микронов до нескольких десятков микронов. Выбоины представляют собой низкоскоростные неглубокие ударные ямки неправильных очертаний. Их форма часто подчиняется структурному строению и форме слагающих породу зерен.

Распространенным элементом рельефа базальтовых зерен являются мелкие трещины различной протяженности (рис. 7). В большинстве случаев они образованы на контактах слагающих породу структурных зон. Происхождение этих трещин связано, по-видимому, либо с ударными процессами, либо с резкими изменениями температуры при остывании базальтовой магмы.

На поверхности базальтовых фрагментов можно наблюдать также пустоты, образование которых происходит чаще всего при вскрытии газовых полостей (рис. 7, 8). Нередко пустоты содержат идиоморфные кристаллы, сформировавшиеся, по-видимому, либо в результате конденсации из газовой фазы при ударных событиях большого масштаба, либо в процессе кристаллизации магмы (рис. 11, 12).

Исходная поверхность базальтовых фрагментов осложнена не только отрицательными формами рельефа, но и положительными. К числу последних следует прежде всего отнести типичные для поверхности всех частиц лунного реголита набрызги застывшего силикатного расплава, образующегося при плавлении лунных пород при высокоскоростоном метеоритном ударе. Разнообразят рельеф базальтовых обломков и многочисленные припекшиеся к их поверхности мелкие частицы реголита.

Породы габброидного типа

Фрагменты лунных микрогаббро отличаются неправильной формой и сложной морфологией поверхности, структурные элементы которой в значительной степени определяются формой слагающих габбро минералов (рис. 13, 15, 17, 20). Наиболее распространенными формами рельефа фрагментов микрогаббро являются всевозможные ударные деформации: выбоины (рис. 15, 20), сколы ступенчатого или раковистого характера (рис. 15, 17, 20, 27, 29), микрократеры (рис. 18, 19, 24, 26). В большинстве случаев образованию морфологических элементов кратеров на поверхности микрогаббро препятствует полизернистость последних, вследствие чего относительно крупные кратеры имеют неправильную форму и сложную, очень неровную поверхность (рис. 24). Развитые кратерные формы наблюдаются чаще всего на поверхностях индивидуальных минеральных зерен породы (рис. 18, 19).

Иногда к ударным деформациям приурочены отдельные трещины или системы трещин, радиально расходящиеся от центра удара (рис. 14). Нередко

трещины, инициированные ударным явлением, проходят по границам минеральных зерен (рис. 23).

На поверхности фрагментов микрограббро встречаются набрызги силикатного расплава, застывшего в виде расплывшихся капель, а также стеклянные сферические частицы (рис. 16). В редких случаях состав набрызгов соответствует никелистому железу, указывающему на то, что набрызг представляет собой застывший расплав метеоритного вещества.

Минералы, входящие в состав микрогаббро, имеют различную степень сохранности. Поверхность одних значительно изменена лунной эрозией, другие имеют чистую, свежую поверхность, на которой нередко присутствует хорошо сохранившаяся индукционная штриховка (рис. 18).

Породы анортозитового типа

Фрагменты пород анортозит-норит-троктолитовой (АНТ) серии, присутствующие в основном в материковом грунте, широко варьируют как по размеру, так и по форме. В доставленных образцах грунта (преимущественно „Луны-20") они в большинстве своем характеризуются формами и поверхностью, значительно обработанными лунной эрозией (рис. 31, 37). Частицы АНТ состава с резкими очертаниями и свежей поверхностью встречаются заметно реже (рис. 35).

Морфологические элементы поверхности пород АНТ серии представлены в значительной мере ударными деформациями, среди которых низкоскоростным формам обычно принадлежит ведущее место. Сколы, выбоины и мелкие кратеры нередко покрывают большую часть поверхности фрагментов (рис. 31, 37). Ударное низкоэнергетическое воздействие проявляется и в развитости существенно осложняющих рельеф мелкоступенчатых изломов по спайности минералов, входящих в состав пород АНТ серии (рис. 38). Более высокоскоростные ударные формы представлены кратерами, которые всегда имеют отлично выраженную воронку и четкий вал (рис. 35, 36). Иногда морфологические элементы кратеров могут быть частично или полностью оплавлены.

При исследовании поверхности частиц АНТ состава было обращено внимание на поры различной величины и конфигурации, образование которых связано, по-видимому, с процессами кристаллизации и перекристаллизации пород. Часто стенки таких пор выстланы минеральными индивидами с отчетливо выраженными ступенями роста (рис. 39).

Поверхность частиц АНТ состава отличается многообразием положительных форм рельефа, среди которых более всего распространены припекшиеся мелкие зерна реголита (рис. 31, 36). Разнообразят общую скульптуру фрагментов и выступающие на поверхность изометричные зерна плагиоклаза, в основном слагающего породу (рис. 31, 34). В формировании общего облика поверхности

частиц пород АНТ серии определенное участие принимают включения отдельных более редких минералов (рис. 43) и металлического железа (рис. 31, 37), выделяющиеся на фоне частиц и имеющие собственный рельеф (рис. 32, 33, 163, 164).

Минеральные зерна

Изучение поверхности минеральных зерен лунного грунта проводилось на зернах плагиоклазов, оливинов и пироксенов — наиболее распространенных породообразующих минералов лунных пород. Обособление отдельных минеральных зерен происходит вследствие раскола и дезинтеграции лунных пород при метеоритной бомбардировке поверхности. Эрозия микрометеоритными ударами и ионами солнечного ветра на протяжении всей экспозиционной жизни минералов существенно меняет присущую им природную форму и практически уничтожает их первоначальную кристаллографическую огранку. Лишь немногие минеральные зерна сохраняют некоторые кристаллографические элементы (рис. 51, 73).

Зерна минералов редко имеют свежий, совершенно не измененный облик. Лунное выветривание формирует сложную скульптуру их поверхности. Основные формы рельефа минеральных зерен представлены низкоскоростными и высокоскоростными ударными деформациями, среди которых наиболее распространенными являются микрократеры различного размера (от десятых долей микрона до десятков микронов) и разнообразной морфологии. Особенной морфологической выраженностью и развитостью элементов (воронки, вала, зоны откола)* обладают кратеры размером более 100 мкм, образованные „снарядом", упавшим перпендикулярно к плоскости спайности минерала-мишени (рис. 53, 54). Однако в большинстве случаев удар происходит под углом к плоскости спайности, и хорошо выраженные кратерные формы почти не наблюдаются, т. к. морфологические элементы кратера осложнены сколами по спайности (рис. 45, 57, 71). Образующиеся кратеры имеют, как правило, несложную морфологию: ударную воронку с заметно шероховатой поверхностью, иногда с раковистым изломом, и небольшой вал. В случае высокоэнергетических ударов кратеры имеют оплавленную воронку чашевидной формы и небольшой оплавленный вал (рис. 47, 63). Другие морфологические элементы имеют ограниченное развитие.

Форма минеральных зерен и скульптура их поверхности нередко связаны с еще одним проявлением ударного воздействия — изломами и характерными сколами по спайности (рис. 45, 49, 56, 83).

* Подробно морфология кратеров рассматривается при описании поверхности сферических частиц (стр. 58).

Поверхность зерен минералов часто осложнена разнообразными линейными элементами (рис. 49, 50), либо определяемыми спайностью (или двойникованием), либо являющимися ударными деформациями. Образование наблюдающейся иногда на минеральных зернах хорошо выраженной тонкой штриховки (рис. 66, 78, 84) может быть обусловлено как ударной эрозией, так и внутренней структурой распада минералов, а также может иметь индукционный характер.

Распространенной отрицательной формой на поверхности минеральных зерен являются трещины, часть которых приурочена к линиям спайности (рис. 78), а другая часть, не подчиняясь спайности, произвольно сечет поверхность зерен (рис. 55).

Положительные формы поверхности минеральных зерен представлены, прежде всего, разнообразными мелкими частицами реголита, спекшимися с зернами минералов в местах поверхностного оплавления, вызванного метеоритными ударами (рис. 55). Количество припекшихся частиц может служить относительным показателем экспозиционного возраста зерен: с увеличением времени пребывания зерен минералов на лунной поверхности плотность припекшихся к ним частиц реголита возрастает.

О степени экзогенной переработки минеральных зерен может свидетельствовать также количество набрызгов силикатного расплава, застывшего на их поверхности в виде расплющенных капель неправильной конфигурации, сферических частиц и корочек (рис. 60, 63, 75, 79). Иногда эти положительные формы рельефа зерен минералов имеют существенно железистый состав, что может быть обусловлено примесью метеоритного вещества в расплаве, образовавшемся при метеоритном ударе (рис. 81).

Одним из положительных элементов рельефа минеральных зерен являются выступающие над их поверхностью участки минералов-включений (рис. 72).

ВТОРИЧНЫЕ ПОРОДЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

Брекчии

Исследованные частицы брекчий являются фрагментами крупных обломков брекчий и представляют собой хорошо упакованные агломераты с относительно непрочной структурой, включающие все типы частиц реголита различного размера и разнообразной формы.

Конфигурация обломков брекчий в целом неправильная, но довольно простая. В основном брекчиям свойственны мягкие плавные очертания (рис. 97, 99, 100), хотя нередко встречаются частицы с угловатыми, резкими контурами (рис. 91, 93).

Поверхность брекчий, как правило, преобразована; и здесь наиболее типичными формами являются всевозможные ударные деформации – кратеры, лунки, выбоины, отчетливо выделяющиеся на фоне неровного, шероховатого рельефа, обусловленного структурным состоянием брекчий. Следует отметить, что хорошо выраженные микрократеры имеют на поверхности брекчий более ограниченное распространение, чем на поверхности кристаллических обломков. Это может быть связано с относительно непрочной структурой фрагментов брекчий. Удары микрометеоритов часто просто разрушают частицы брекчий, а следы удара в виде микрократера остаются в основном на поверхностях наиболее плотных частиц и стеклянных набрызгов (рис. 89). Низкоскоростные ударные формы — неглубокие кратеры с простой морфологией, лунки и выбоины широкого спектра размеров — представляют собой весьма распространенный элемент морфологии брекчий (рис. 87, 88, 91).

К характерным формам поверхности фрагментов брекчий относятся пленки – набрызги застывшего силикатного пузырчатого расплава, сквозь которые нередко проступают отдельные минеральные зерна (рис. 91, 94, 98, 103). Контакт стекла и поверхности брекчий в подавляющем большинстве случаев резкий, что может свидетельствовать о плохой смачиваемости расплавом их поверхности. Силикатные пленки почти всегда отличаются высокой пористостью, вызванной выделением газов в остывающем силикатном расплаве. Поверхность частиц брекчий нередко осложнена трещинами, образовавшимися в результате слабого механического воздействия на них, а также порами и пустотами (рис. 97, 100).

Одним из интересных явлений следует назвать наблюдающуюся на некоторых частицах параллельную штриховку, напоминающую зеркала скольжения в зонах сдвигов в земных породах (рис. 99). Можно полагать, что образование таких поверхностей на лунных брекчиях идет по аналогичному механизму и связано с подвижками масс пород при метеоритных ударах или движением массы вещества по склону.

Агглютинаты

Спекшиеся индивидуальные частицы лунного реголита – агглютинаты – обладают необычной формой и рельефной морфологией поверхности, обусловленными их генезисом. Происхождение агглютинатов – спекание зерен реголита в местах поверяхностного плавления, вызванного метеоритными ударами, а также цементация мелких частиц реголита набрызгами образующегося при ударных явлениях силикатного расплава – определяет своеобразную, ветвистую, часто дендритообразную их форму и значительную неровность, шероховатость большей части их поверхности (рис. 105, 106, 111). Формируясь непос-

редственно из реголита, агглютинаты включают в себя все типы его частиц самого различного размера (рис. 110).

Агглютинаты представляют собой образования относительно непрочные. Особенной непрочностью обладают спекшиеся участки агглютинатов, сформировавшиеся при спекании отдельных зерен реголита в местах их контакта и имеющие рыхлую упаковку (рис. 108). Участки агглютинатов, возникшие при цементации зерен лунного грунта силикатным расплавом, более прочны, хотя также достаточно хрупки.

Поверхность агглютинатов довольно неоднородна. Шероховатые участки спекшихся зерен, неровность рельефа которых вызвана их агрегатным состоянием, сменяются зонами с поверхностями, покрытыми пузырчатым гладким стеклом (рис. 112). Остеклованные поверхности редко бывают ровными. Как правило, они осложнены вскрытыми и невскрытыми газовыми пузырями, кратерами, прилипшими частицами реголита (рис. 105, 109).

Характерным элементом остеклованных поверхностей агглютинатов являются полусферические бугорки (размером от долей микрона до 10—15 микронов), часто присутствующие в виде цепочек и разнообразного вида узоров (рис. 113, 114). Подобного рода образования состоят преимущественно из металлического железа. В качестве примесей могут присутствовать Ni, Co, S, P. Вероятны, по крайней мере, три пути происхождения полусферических бугорков: 1. разбрызгивание ударного расплава или конденсация из паровой фазы, образовавшейся при ударном плавлении пород в результате падения метеорита на поверхность Луны (в этом случае полусферические бугорки имеют в качестве примесей Ni и Co); 2. восстановление силикатного железа водородом солнечного ветра (в этом случае сферические бугорки состоят только из Fe); 3. инконгруентное плавление железистых силикатов с последующей ликвацией и обособлением металлического расплава (образующийся при этом металл также состоит из чистого Fe). Интересно отметить, что полусферические бугорки часто концентрируются в понижениях рельефа остеклованных поверхностей (рис. 112).

Стекла

Образование вторичных стекол является результатом разнообразных ударных явлений. Обломки вторичных стекол присутствуют в лунном реголите в виде набрызгов на поверхности частиц всех типов (о чем уже неоднократно говорилось выше), в виде сферических частиц (описание которых будет дано в конце раздела), а также в виде отдельных угловатых частично разрушенных фрагментов, характеристика которых следует ниже.

Осколки вторичных стекол имеют самую различную конфигурацию. Чаще всего им свойственна неправильная форма с резкими и угловатыми очерта-

ниями (рис. 115, 119), обусловленными, в первую очередь, своеобразным острым характером сколов, присущим изотропному стеклянному материалу. Фрагменты сглаженного, мягкого облика встречаются редко. Мягкие, плавные формы приобретают лишь те частицы стекла, поверхность которых в течение длительного экспозиционного периода не испытывала заметного ударного воздействия, а подвергалась лишь тонкой шлифовке частицами солнечного ветра (рис. 116).

Наиболее распространенным скульптурным элементом поверхности стекол являются сколы, образующиеся при хрупкой деформации стекла, вызванной низкоэнергетическими ударами (рис. 115, 119, 121). Сколы обладают типичным для стекла раковистым изломом, который наблюдается на поверхности практически всех низкоскоростных ударных деформаций (кратеров, выбоин), широко развитых на стеклянных фрагментах. Высокоскоростные деформации – высокоскоростные кратеры – также типичны для стекол. Их формирование всегда сопровождается частичным или полным оплавлением и хорошим развитием морфологических элементов (см. стр. 59, 60).

Характерную форму поверхности стеклянных частиц представляют вскрытые газовые полости – правильные округлые депрессии с ровной и гладкой поверхностью, иногда частично заполненные мелкими зернами реголита (рис. 120, 122). В редких случаях вскрытые газовые полости имеют небольшой псевдовал, возникновение которого может быть обусловлено морфологией сколов вокруг полости (рис. 121).

Рельеф фрагментов стекла разнообразят прилипшие мелкие частицы реголита, особенно отчетливо выделяющиеся на гладкой ровной стеклянной поверхности (рис. 119, 121).

Интересным морфологическим элементом поверхности стекол являются мелкие каплевидные образования полусферической или эллипсоидальной формы размером от десятых долей микрона до нескольких микронов (рис. 117, 118). Иногда при слиянии нескольких капель возникают более крупные формы с неправильными очертаниями (на рис. 119 справа). Характерная особенность каплевидных образований – слабое смачивание ими поверхности стеклянных фрагментов и отсутствие в них пористости. По химическому составу капли соответствуют веществу базальтового типа и отличаются от состава подложки повышенным содержанием железа. Формирование каплевидных образований можно, вероятно, объяснить падением крупной капли уже застывающего силикатного расплава на поверхность стекла. Температура расплава была такова, что капля не смогла смочить поверхность стекла, а разбилась на мелкие капельки микронного и субмикронного размера. Однако правильная форма каплевидных образований и отсутствие в них пористости позволяют также предполагать, что их формирование может являться и результатом конденсации обогащенных железом силикатных паров на поверхности стеклянной частицы.

Стеклянные сферические частицы

Стеклянные сферические частицы составляют по объему незначительную часть лунного грунта, однако распространены повсеместно и представляют собой специфическую составляюшую реголита. Морфология их поверхности крайне разнообразна и практически всегда четко выражена, что обусловлено как своеобразным генезисом стеклянных сферул, так и их изотропностью и хрупкостью, а также гладким ровным характером поверхности. Описанию и интерпретации морфологии стеклянных сферических частиц уделено в настоящей работе особое внимание.

Изучение поверхности стеклянных сферических частиц позволило разделить элементы их микрорельефа на две основные группы – группу отрицательных и группу положительных форм. При этом за поверхность относительности принималась поверхность правильной сферы.

Среди отрицательных элементов рельефа наиболее характерной формой являются микрократеры, образование которых, как и в случае всех ранее описанных типов частиц, обусловлено ударными процессами. Подробное исследование морфологии микрократеров на стеклянных поверхностях сделало возможным провести деление кратеров по характеру разрушения вещества при их образовании на два основных типа:

1. характеризующиеся только дроблением вещества (кратеры дробления);
2. несущие заметные следы плавления (кратеры оплавления).

Кратеры дробления (рис. 129) на поверхности стеклянных сферул представляют достоточно часто встречающийся, но не преобладающий морфологический тип. Морфологические элементы в различных случаях выражены с неодинаковой четкостью, и полное представление о них возникает при сопоставлении ряда форм. В целом в кратерах дробления прослеживаются следующие зоны.

В центре кратера расположена небольшая лунка или выбоина, вероятно, след непосредственного удара частицы – „снаряда". Эту зону мы называем ударной воронкой. Она характеризуется пологими склонами и неровной шероховатой поверхностью. Шероховатость поверхности обусловлена дроблением вещества частицы – „мишени" в результате удара. Отношение глубины ударной воронки к ее диаметру заметно колеблется в разных случаях и приблизительно может быть оценено как 1 : 4 – 1 : 6.

Вторую зону образует зона раковистого скола, возникающая, вероятно, при напряжениях, имеющих существенную тангенциальную составляющую. Эта зона, называемая нами зоной откола, слагается серией относительно крупных раковин, образованных в результате откола чешуек стекла и примыкающих к ударной воронке наподобие цветочного венчика.

Вследствие чечевицеподобной формы откола на границе между первой и второй зонами возникает возвышение типа вала (которое в данной работе мы

просто называем „валом" по аналогии с обычными метеоритными кратерами), окаймляющее ударную воронку, а между отдельными секторами („лепестками") скола — система радиальных гребней-ребер. При достаточной развитости такой системы зона откола принимает вид отдельных кольцевых секторов, разделенных гребнями. Внешняя граница зоны откола выражена достаточно четко.

Вокруг зоны откола часто наблюдается еще одна зона нарушений, которая при полном развитии образует вторую зону откола, но чаще всего лишь намечается в виде серии трещин отслаивания. Эту зону мы называем зоной отслаивания. Здесь чешуйки стекла, разделенные трещинами, несколько приподнимаются с внутренней стороны, образуя некоторый „псевдовал" кратера, поднимащщийся над первоначальной поверхностью стеклянной частицы.

Для этого типа кратеров наиболее характерное отношение диаметра ударной воронки к диаметру всего кратера находится в пределах 1 : 3 — 1 : 4.

Кратеры оплавления (рис. 130—133) состоят из тех же основных морфологических элементов-зон, которые были отмечены для кратеров дробления, однако для них весьма характерна оплавленность центральной части (ударной воронки и вала), а часто и периферийных зон. Морфологически зоны кратеров оплавления выражены достаточно четко. В них ясно выделяется оплавленная центральная кратерная воронка, окруженная оплавленным валом, который усиливает рельефность границы воронки. Вблизи кратера нередко наблюдаются радиально расходящиеся от него тонкие нити застывшего на поверхности частицы расплава.

По морфологическим признакам изученные нами кратеры оплавления можно, достаточно условно, разделить на два подтипа.

Первый подтип (рис. 130, 131) составляют кратеры с оплавленными кратерной воронкой и валом и довольно обширной зоной откола, которая не оплавлена и характеризуется раковистым изломом, как и в кратерах дробления. Отношение диаметра ударной воронки к диаметру всего кратера находится в пределах 1 : 2,5 — 1 : 3,0, т. е. несколько больше, чем в кратерах дробления. Граница между зоной откола и нетронутой поверхностью частицы резкая и неровная. Этому подтипу кратеров обычно сопутствуют трещины отслаивания, возникающие вдоль внешней границы зоны откола и образующие зону отслаивания.

Кратеры оплавления второго подтипа (рис. 132, 133) характеризуются оплавленностью не только центральной воронки и окружающего ее вала, но и зоны откола. Последняя обычно представляет собой хорошо выраженные радиальные округлые гребни, усиленные расплавленным материалом, и разделяющие их депрессии. Ширина зоны откола у кратеров этого подтипа заметно меньше, чем у кратеров первого подтипа. Зона отслаивания выражена четко, нередко представляя почти замкнутую единую кольцевую структуру. Отношение диаметра ударной воронки к диаметру всего кратера возрастает до 1 : 1,5.

Нужно еще раз отметить, что приводимое деление кратеров на типы и подтипы достаточно условно, и существует полный спектр переходов кратерных форм от мелких сколов до глубоких проплавленных воронок.

Различия в морфологическом строении рассмотренных выше кратеров довольно четко отражают различия в скорости частиц, вызвавших образование этого кратера. Очевидно, кратеры дробления связаны с ударами наименее быстрых частиц, среди которых, вероятно, могут быть как частицы внелунного происхождения, наименьшая скорость падения которых на Луну равна приблизительно 2,4 км . $с^{-1}$, так и фрагменты лунных пород, выброшенные из кратеров при высокоскоростных ударных явлениях. Образование кратеров оплавления как первого, так и, особенно, второго подтипов требует высоких скоростей и связано с ударами частиц внелунного — метеоритного или кометного - происхождения. Экспериментальными работами установлено (Херц и др., 1975), что оплавление кратерных воронок происходит в тех случаях, когда частицы — „снаряды" имеют скорости $\geqq$ 3 км . $с^{-1}$. Оплавление зоны откола вызывают удары частиц с несколько большими скоростями — $\geqq$ 5 км . $с^{-1}$.

Приведенные выше рассуждения справедливы, видимо, лишь для случаев образования кратеров на поверхностях полностью охладившихся и затвердевших частиц. При высокоскоростной бомбардировке горячих поверхностей для образования кратеров со следами оплавления требуется заметно меньшая энергия удара (скорость „снаряда"), чем при бомбардировке холодных „мишеней". Такая ситуация может иметь место при столкновении частиц во взрывном облаке, когда образовавшиеся, но еще не успевшие окончательно охладиться и затвердеть капли силикатного расплава сталкиваются с твердыми частицами реголита.

Наряду с кратерами — формами рельефа, возникшими в результате достаточно энергичного внешнего воздействия, на поверхности стеклянных сферических частиц обычны различные отрицательные формы иного происхождения. К ним относятся, прежде всего, лунки — небольшие округлые в плане образования с мягкими сглаженными очертаниями (рис. 136, 139, 140), размер которых колеблется примерно от 1 до 15 мкм, что приводит к заметно различной их выраженности в рельефе. Иногда лунки окружены очень небольшим валом. Рассматриваемые лунки сингенетичны самим частицам и возникают в результате выделения расположенных в непосредственной близости от поверхности частицы пузырьков газа из силикатного расплава в момент затвердевания частицы, что и определяет их морфологические характеристики.

Многие лунные стеклянные сферические частицы характеризуются наличием полостей — округлых углублений разного диаметра и глубины (рис. 135). Полости довольно хорошо идентифицируются морфологически: они, как правило, не имеют вала и не окружены зоной трещиноватости. Их стенки более круты, чем стенки кратерных воронок и лунок. Образование полостей в теле

частиц связано, вероятно, как и в случае образования лунок, с выходами газов из силикатного расплава до окончательного затвердевания самих сферул. Однако здесь имеет место выход газовых пузырьков из „недр" частиц, а не из приповерхностной их оболочки. Наличие полостей в теле сферических частиц может, очевидно, служить достаточно четким свидетельством образования последних из расплава, а не в результате процессов конденсации.

Пустоты – отверстия с неровными, остроугольными очертаниями, не несущими каких-либо следов оплавления, – довольно распространенный элемент рельефа поверхности стеклянных сферических частиц (рис. 131, 137). Они образуются в результате вскрытия газовых полостей, находящихся в теле твердых стеклянных сферул. Обычно пустоты окаймлены светлым кольцом различной ширины, четко выделяющимся на поверхности частиц. Это кольцо представляет собой остаток тонкой стеклянной корочки, ограничивающей газовое включение. Сама вскрытая пустота бывает заполнена, как правило, обломками распущенной стеклянной корочки и мелкими частицами грунта. Для вскрытия газового включения, по-видимому, могло быть достаточно небольшого внешнего воздействия на хрупкую, уже затвердевшую силикатную корочку.

Обычными элементами поверхности стеклянных сферических частиц являются неглубокие с мягкими очертаниями ямки и желобки различной протяженности (рис. 133). Эти формы образовались, вероятно, в результате столкновения еще не полностью затвердевшей сферической частицы либо с частицами взрывного облака, либо с частицами реголита на поверхности Луны.

Весьма интересно образование, представленное на рис. 138. Мягкая сглаженная форма как самой депрессии, так и находящегося в ней возвышения, указывают, что такие образования не могли возникнуть в теле стеклянной частицы после полного ее затвердевания. Можно предположить, что образование подобных форм происходит в результате соударения стеклянной сферулы с какой-либо посторонней частицей в момент, когда приповерхностная зона сферулы близка к затвердеванию, но еще достаточно пластична, а ее внутренняя часть находится в жидком состоянии. При этом инородная частица пробивает пластичную оболочку сферулы и вскрывает расплавленное вещество.

Для поверхности лунных стеклянных сферических частиц весьма характерны также различные положительные формы рельефа.

Нередко сама поверхность частицы является бугристой, причем обычно в этом случае она осложнена рассмотренными выше многочисленными лунками – следами выхода газов (рис. 140). Общий характер поверхности позволяет считать, что она приобрела такую структуру в процессе образования и затвердевания стеклянной сферической частицы.

Для большинства стеклянных сферул характерно наличие многочисленных мелких частиц реголита различного размера и формы, припекшихся к ее поверхности (рис. 123–126). В одних случаях такие частицы в значительном

количестве группируются на одной стороне шарика, что указывает на прилипание их к частице при падении последней в еще вязком состоянии на поверхность реголита, в других случаях частицы расположены беспорядочно по всей поверхности сферулы, и видимо, прилипли к ней в полете в образовавшемся при взрыве облаке.

Обычной формой рельефа стеклянных сферических частиц являются брызги расплавленного вещества, застывшие на поверхности частицы (рис. 140, 142). Как правило, они не связаны с кратерами, имеющимися на данной частице и, следовательно, состоят из вещества, постороннего для нее. Следует отметить, что такие брызги могут состоять как из силикатного стекла, так и из металла. Их размеры и форма самые разнообразные.

К зоне кратеров оплавления приурочены часто нитевидные валики — застывшие нити расплавленного вещества, выброшенного из этого кратера при его образовании (рис. 131). Валики располагаются в общем радиально по отношению к кратеру. Ширина валиков колеблется от десятых долей микрона до нескольких микронов, длина редко превышает величину диаметра кратера.

Иногда нитеридные валики, подобно брызгам, не связаны с кратерами данной частицы. В этом случае они образуют системы параллельных нитей довольно значительной протяженности, нередко пересекающихся под разными углами (рис. 141).

Для поверхности стеклянных сферических частиц типичной положительной формой являются очень мелкие полусферические бугорки и сферы размером от десятков долей микрона до примерно 10 мкм (рис. 143—148), иногда образующие небольшие линейно вытянутые цепочки или узоры. Морфология, генезис и химический состав этих образований были рассмотрены при описании поверхности агглютинатов (см. стр. 55, 56).

В некоторых случаях на стеклянных сферических частицах можно наблюдать тонкие полупрозрачные пленки силикатного состава, покрывающие часть поверхности (рис. 147). Вероятнее всего, подобные тонкие образования представляют собой конденсат из газовой силикатной фазы.

Таким образом, стеклянные сферические частицы лунного реголита характеризуются значительной сложностью рельефа поверхности, отражающей сложность их геологической истории.

Некоторые элементы рельефа обязаны своим возникновением внутренним процессам, имевшимместо при плавлении вещества и последующем остывании и затвердевании его в виде сферических стеклянных частиц. К ним относятся в основном лунки и полости, возникшие при дегазации силикатного расплава. Ряд форм возникает на поверхности еще пластичных сферул во время их остывания под действием факторов, внешних по отношению к самой частице. Образующиеся при этом как положительные, так и отрицательные элементы рельефа — отпечатки частиц грунта, депрессии сложной формы, припекшиеся

к сферулам частицы и т. д. – также усложняют микроморфологию поверхности силикатных сферических образований.

Значительное усложнение рельефа, хорошо заметное на гладкой поверхности стеклянных сферул, происходит уже после полного их затвердевания. Возникающие при этом образования – кратеры различных типов, брызги и нитевидные валики, бугорки и др. – связаны непосредственно и главным образом с различными процессами трансформации вещества под влиянием интенсивной метеоритной бомбардировки поверхности Луны: процессами дробления, плавления и разбрызгивания, испарения и конденсации.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ И МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Частицы металла в лунном реголите присутствуют в виде: 1. включений во фрагментах магматических пород; 2. тонкодисперсных частиц, образовавшихся в результате процессов восстановления из содержащих железо силикатов и стекол при ударном и термальном метаморфизме; 3. идиоморфных кристаллов металлического железа, сформировавшихся в порах магматических, а также перекристаллизованных и переплавленных пород в результате кристаллизации из газовой фазы; 4. включений во вторичные породы или отдельных частиц, по составу отвечающих метеоритному металлу. Наиболее широко на поверхности Луны представлена последняя форма металла, которая и будет рассмотрена ниже.

Металлические частицы метеоритного состава (отношение Fe : Ni не более 20 : 1, содержание Co порядка 0,5%) образуются из метеоритного расплава, возникающего при падении и взрывах метеоритов на лунной поверхности. Генезис этих частиц определяет их преимущественную сферическую форму: правильные сферы, грушевидные частицы и т. п. Неправильные угловатые формы менее распространены. Сферические частицы размером около 1 мм и менее имеют обычно достаточно правильную округлую форму и относительно однородную поверхность. Для более крупных частиц характерны заметные отклонения от правильной сферы, они имеют в большинстве случаев грушевидную форму и очень сложную разнородную поверхностную структуру.

Поверхность металлических сферических частиц размером менее 1 мм определяется элементами рельефа, широко распространенными на поверхности всех типов частиц реголита: ударными деформациями (рис. 151, 162), трещинами, образовавшимися при охлаждении материала частиц (рис. 162), бороздами и царапинами, возникшими при эрозии поверхности мелкими частицами взрывного облака или реголита (рис. 151, 162). Морфология более крупных частиц очень своеобразна и сложна. На рис. 154–160 представлены участки поверхности сферической металлической частицы грушевидной формы размером 4,4 × 5,5 мм (рис. 153). Большая часть сферулы имеет глобулярную

поверхностную структуру: отдельные металлические глобулы размером 100—200 мкм спаяны воедино, формируя общий в целом бугорчатый рельеф (рис. 154, 155). Некоторые участки имеют неровный волнистый рельеф со следами текучести материала частицы по ее поверхности (рис. 159). Особый интерес представляют участки с мозаичным рельефом, представленные на рис. 160.

Неоднородность поверхности описываемой металлической сферулы отражает, очевидно, ее сложный генезис и сложную внутреннюю структуру. Общая грушевидная форма частицы позволяет предположить, что основу ее составляет капля метеоритного расплава. К ее поверхности приварились мелкие металлические сферулы, находившиеся в еще расплавленном или затвердевающем состоянии. Последние могли, вероятно, быть как мелкими брызгами метеоритного расплава, так и конденсатными образованиями, сформировавшимися из возникающей при ударах газовой фазы.

К периоду оформления капли металла в частицу относится появление в ее теле пор и полостей. Демонстрируемая на рис. 156 депрессия имеет морфологические характеристики — строго округлую форму, отсутствие вала, отвесные *стенки — позволяющие ее считать газовой полостью. Концентрирующиеся* вокруг полости мелкие эллипсоидальные зерна являются, по всей вероятности, конденсатными образованиями. Большая полость треугольной формы, представленная на рис. 157 и 158, возникла при агрегировании мелких глобул в месте, где между ними отсутствует контакт.

После затвердевания металлическая частица испытала неоднократное ударное воздействие. На рис. 154 представлен высокоскоростной ударный кратер с морфологией, весьма типичной для кратеров на металлических поверхностях. Прежде всего, обращает на себя внимание значительная глубина ударной воронки, величина отношений которой к диаметру весьма высока и составляет 1 : 1,5. Довольно специфична морфология вала: бровка его узкая, *внешняя часть не сплошная и в некоторых частях как бы подвернута внутрь.*

Фрагменты металла метеоритного состава присутствуют в лунном реголите и в виде относительно крупных включений во вторичных частицах (чаще всего с брекчиях, рис. 161, 162). Расплавленный металл, образовавшийся при метеоритных взрывах, попадает в раздробленный слой мелкозернистого материала и в дальнейшем входит в состав вторичных частиц при последующей метаморфизации реголита.

В ряде случаев включения металла имеют четко выраженные ступени роста (рис. 163, 164), требующие для своего образования условий для свободного роста. Такие формы металла наблюдались в порах фрагментов материковых пород анортозитового типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МИКРОМОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ЛУННЫХ ЧАСТИЦ

Применение метода растровой электронной микроскопии позволило детально изучить поверхностную морфологию частиц лунного грунта, способствующую пониманию ведущих процессов его формирования и развития.

Анализ формы, рельефа и структуры основных типов частиц реголита показал, что образование последних, а также образование подавляющего большинства форм на поверхности частиц вызвано ударными процессами как первичного (метеоритного), так и вторичного характера. Ударное дробление лунных пород обусловливает возникновение первичного обломочного материала реголита — обломков магматических пород и минеральных зерен. Те же ударные процессы приводят и к формированию вторичных типов частиц реголита — брекчий, вторичных стекол, стеклянных шариков и агглютинатов, из которых последние предсталяют собой образования специфические, не встречающиеся в земных условиях. Стеклянные сферические частицы являются брызгами расплавленных при метеоритных ударах лунных пород и обладают формой и морфологией поверхности (рис. 123—150), отражающими их генезис и последуюшую экзогенную историю. Агглютинаты представляют собой индивидуальные частицы (или их обломки), изучение микростроения которых позволяет заключить, что они формируются как в результате спекания зерен реголита в местах поверхностного плавления, вызванного опять же метеоритными ударами (рис. 106), так и при цементации мелких зерен реголита брызгами ударного горячего силикатного расплава (рис. 105). Консолидация зерен реголита в частицу агглютината происходит под воздействием высокого нагрева, вызывающего значительное остеклование компонентов частицы.

Исследование микроструктуры агглютинатов позволило обнаружить, что они являются образованиями довольно хрупкими и рыхлыми, значительно менее прочными, чем брекчии, имеющие заметно более плотную упаковку составляющих их зерен (рис. 95, 96 и 108, 110). Формирование брекчий происходит при цементации зерен реголита в массу также в результате ударных процессов, однако при нагреве менее существенном, чем требуется для агломерации в агглютинат. Об этом свидетельствует отсутствие такой яркой оплавленности зерен, какая характерна для компонентов агглютинатов.

Генезис частиц реголита обусловливает их первоначальную форму и структурные особенности поверхности. Свежие обломки магматических пород отличаются резкими угловатыми очертаниями, их поверхность полностью определяется структурой и характером слагающих их зерен (рис. 9, 10, 13, 14, 23, 24). Свежие зерна минералов имеют свойственную им форму (рис. 49, 61) и элементы кристаллографической огранки (рис. 51). Для малоизмененных поверхностей брекчий характерны шероховатость и бугорчатость, непосредственно связанные с самой структурой брекчий (рис. 100). Причудливая форма агглютинатов и общий облик поверхности (рис. 111), целиком предопределены их происхождением. Форма сферических частиц также однозначно указывает на их генезис (рис. 123, 127).

Первоначальные форма и общий характер поверхности частиц реголита претерпевают значительные изменения в связи с их последующей геологической историей, с воздействием на них экзогенных лунных факторов, среди которых ведущая роль принадлежит, как не раз было указано выше, ударным процессам различного масштаба.

Наиболее распространенными ударными формами, наблюдаемыми на поверхности практически всех частиц реголита, являются ударные депрессии – сколы, выбоины, кратеры, морфология которых определяется главным образом энергией удара и свойствами вещества мишени.

Низкоэнергетические удары образуют на поверхности зерен реголита в большинстве случаев сколы и выбоины, которые на стеклянных поверхностях всегда имеют отчетливо выраженный характерный для стекла раковистый излом (рис. 116, 121), а на кристаллических фрагментах в большинстве случаев подчиняются их структуре и кристаллическому строению. В последнем случае сколы имеют, как правило, неровную, шероховатую поверхность, отражающую зернистость породы (рис. 23, 30). На мономинеральных зернах сколы часто обладают ступенчатым рельефом, обусловленным спайностью минералов (рис. 46, 56).

Аналогичным образом кристаллическое строение фрагментов пород и зерен минералов проявляется в морфологии образованных на их поверхности низкоскоростных кратеров: ударная воронка, часто не отличающаяся правильной округлой формой, имеет мелкобугорчатый рельеф; зона откола не всегда развитая, в большинстве случаев характеризуется слабой выраженностью и неправильной формой, которая подчиняется кристаллической структуре и границам отдельных зерен (5, 24, 57). Низкоскоростные кратеры, образованные на хрупких и изотропных стеклянных мишенях, имеют развитые четко определяемые морфологические элементы: воронку чашевидной формы, хорошо выраженный вал и зону откола, обычно округлую и концентричную по отношению к ударной воронке (рис. 129). Иногда к зоне откола примыкает зона отслаивания, не всегда полностью сформированная. Все морфологические элементы низкоскоростных кратеров на стекле обладают поверхностью с раковистым изломом.

При высокоэнергетических ударах, сопровождающихся плавлением вещества мишени, влияние свойств последней на морфологию кратеров проявляется в значительно меньшей степени. Кратеры, образованные высокоскоростным „снарядом", независимо от свойств мишени, всегда включают основные элементы — оплавленную округлую воронку и оплавленный вал (рис. 19, 33, 131). У кратеров диаметром более 1 мкм часто наблюдается хорошо развитая, концентричная по отношению к воронке, зона откола, нередко также оплавленная (рис. 54, 132), степень развитости которой возрастает с увеличением размера кратера.

Необходимо отметить, что существует спектр переходов кратерных форм, сочетающих в себе морфологические черты как низкоскоростных, так и высокоскоростных кратеров (рис. 130).

Частицы реголита, экспонируемые на лунной поверхности, подвергаются воздействию ударов постоянно. Энергия ударов обусловливает характер и степень изменения рельефа частиц. Самая тонкая компонента метеоритного потока, а также ионы солнечного ветра постоянно производят обработку поверхности частиц реголита, сглаживая их очертания, с одной стороны (рис. 62, 116), с другой — усложняя их микротопографию образованием мелких линейных форм (рис. 77), мелких трещин по спайности (рис. 79). Более энергетичные удары формируют сколы, кратеры, крупные трещины. Удары с высокой энергетической плотностью вызывают образование сдвиговых деформаций в кристаллических решетках минералов (рис. 68), заметно изменяя рельеф частиц.

Влияние ударов на рельеф частиц реголита проявляется также и в широком развитии на их поверхности набрызгов расплавов, образующихся при ударном плавлении лунных пород (рис. 80, 98). Часто набрызги имеют неправильные расплывчатые очертания и обладают пористостью, связанной с дегазацией расплава. Форма набрызгов и характер контакта с поверхностью частицы определяются температурой их расплава. Горячие расплавы хорошо смачивают поверхность подложки и свободно по ней растекаются (рис. 105, 141). Расплавы остывающие смачивают частицы слабо или совсем не смачивают (рис. 59, 64), контакт расплав-подложка носит четкий, резкий характер. Иногда в результате несмачивания поверхности брызги расплава разбиваются на ней на мелкие капельки, застывающие в виде сфероидальных частиц (рис. 118). В некоторых случаях брызги расплава образуют на поверхности подложки сферические частицы (рис. 16).

Ударные явления оказывают косвенное влияние на формирование в лунном реголите новообразований как продуктов конденсации из газовой фазы, образующейся при достаточно мощных метеоритных взрывах, а также как продуктов ударного переплавления и перекристаллизации лунного вещества. Одной из наиболее широко распространенных форм новообразований являются железистые (с примесью в разных случаях Ni, Co, S, P) сферические и по-

лусферические частицы очень маленьких (в большинстве случаев менее 1 мкм) размеров, особенно развитые на поверхностях не проплавленных целиком стеклянных сферул и набрызгов ударного расплава (рис. 114, 146). Полусферы, судя по их морфологии, представляют собой вышедшую на поверхность половину сферической частицы, другая половина которой находится в стекле под его поверхностью. Характер внедрения мелких сфер в основное вещество может указывать на их образование, скорее всего, в результате ликвации, хотя вполне вероятны как конденсационный механизм при ударных явлениях большого масштаба, так и восстановление лунного силикатного железа водородом солнечного ветра и последующее укрупнение металлических образований при ударном плавлении.

Интересной формой новообразований являются кристаллы минералов (железа, а также силикатов – плагиоклаза, пироксена, оливина), обнаруженные в порах обломков магматических пород и брекчий (рис. 12). В изученных фрагментах такие образования имеют ограниченное распространение. Однако в больших порах крупных обломков пород, доставленных экспедициями Аполло, они развиты достаточно широко. Вероятно, эти фазы (особенно железо) также могут рассматриваться как продукты конденсации испаренного при метеоритных взрывах вещества. Однако не исключено, что их образование (в частности, силикатов), кроме того, может быть связано с заключительными стадиями магматического процесса за счет перекристаллизации породообразующих минералов в порах пород при активности газовой компоненты.

Поток метеоритов, как каменных, так и железных, различной массы постоянно обрабатывает лунный реголит. Вещественные следы метеоритных ударов в виде частиц металлического железа метеоритного состава присутствуют во всех образцах реголита. Остатки каменных метеоритов, составляющих большую часть выпадающего на поверхность Луны метеоритного вещества, найдены в лунных образцах в очень малых количествах, что определяется в первую очередь трудностью их идентификации. Метеоритный металл в лунном реголите представлен главным образом железо-никелевыми сплавами (камасит и тэнит) и наиболее широко распространен во фрагментах вторичных пород в виде сферических каплеобразных, реже неправильных, частиц.

В целом морфология лунных металлических частиц, как и силикатных, зависит от их состава, структуры и условий образования, определяющих их первоначальную морфологию, а также от эффективности и характера воздействия экзогенных факторов, с которыми связано формирование наложенных элементов рельефа. Однако морфология металлических частиц заметно отличается от морфологии силикатных фрагментов вследствие пластичности металла, что заметно опредеяет характер последующих деформаций металлических частиц (рис. 152, 155).

Интересно отметить, что морфология поверхности металлических частиц часто зависит от их размера. Небольшие сферические частицы металла (разме-

ром до 1 мм) имеют относительно простой рельеф. На гладкую сферическую поверхность, сформировавшуюся при застывании расплава, осложненную иногда трещинами охлаждения, наложены разнообразные экзогенные формы поверхности: ударные деформации, борозды, отдельные царапины, возникшие при эрозии металла мелкими частицами взрывного облака и реголита.

Крупные сферические частицы отличаются более сложным характером рельефа, отражающим их сложное внутреннее строение. Представленная на рис. 153 металлическая частица состоит, согласно проведенным специальным минералогическим исследованиям, из камасита, шрейберзита и троилита. Встречаются также отдельные включения хромита, тэнита и силикатов. Относительно крупные выделения в камаситовых полях, сцементированные камасит-фосфидной эвтектикой, образует троилит. К троилиту приурочены хромит и тэнит. На поверхности частицы заметны скопления силикатов.

Частица в целом имеет глобулярную структуру, особенно четко выраженную в периферических частях. Эта внутренняя структура отчетливо прослеживается в глобулярном характере поверхности (рис. 154). Глобулы размером порядка 100—200 мкм спаяны камасит-фосфидной эвтектикой. Структура камасит-фосфидной эвтектики отражена, по-видимому, на участках поверхности со сложным мозаичным рельефом (рис. 160). Часть поверхности металлической сферической частицы отличается волнистым рельефом со следами текучести материала частицы (рис. 159). Морфология таких форм поверхности, так же как и морфология кратеров на металле (рис. 155), отражает пластичные свойства последнего.

Итак, исследование морфологии поверхности лунных частиц показало, что движущей силой развития реголита являются ударные процессы, проявления которых в виде повсеместно развитых специфических типов частиц (агглютинатов, стеклянных сферических частиц), ударных форм, а также связанных с ударами новообразований можно обнаружить практически на всех частицах реголита. Достоверных следов каких-либо других процессов, принимающих активное участие в формировании и развитии реголита, до сих пор не обнаружено. Следует в частности указать на отсутствие на поверхности частиц признаков их пирокластического происхождения, которые известны для вулканического пепла на Земле.

Ударные процессы изменяют как физическое состояние реголита в целом (дробление лунных пород и агломерация мелких зерен во вторичные частицы) и составляющих его частиц (образование разнообразных ударных форм на поверхности), так и его химические характеристики (формирование новообразований).

Степень эродированности поверхности частиц реголита (т. е. количество морфологических форм, усложняющих их первоначальную топографию) является очень важной его характеристикой и отражает степень его зрелости. Наличие в реголите частиц, обладающих различной степенью изменения

поверхности, свидетельствует о том, что идет поступательный процесс развития реголита.

Таким образом, исследования морфологии поверхности частиц реголита показали направление эволюции реголита и позволили выявить основные факторы, определяющие эту эволюцию.

РЕЗЮМЕ

Методами растровой электронной микроскопии изучена морфология частиц лунного грунта, доставленного советскими автоматическими станциями „Луна-16“ и „Луна-20“. Исследованы как первичные, так и вторичные компоненты литологического состава реголита. Первые представлены фрагментами магматических пород базальтового или габроидного типов, характерных для морских районов Луны, фрагментами метаморфизованных материковых пород анортозитовой серии и обломками минеральных зерен. Вторыми являются фрагменты экзогенного происхождения: брекчии, агглютинаты, стекла и стеклянные сферические частицы. Кроме того, изучена поверхность металлических частиц и включений металла в фрагментах пород, а также морфология новообразований минералов, как продуктов экзогенного процесса. Морфология поверхности частиц лунного реголита иллюстрирована 164 фотографиями.

Ведущая роль в формировании морфологии фрагментов реголита принадлежит экзогенным процессам ударно-взрывного характера, связанным с метеоритной и микрометеоритной бомбардировкой лунной поверхности. Признаков, указывающих на пирокластическое происхождение частиц реголита, не обнаружено. Следствиями интенсивной метеоритной бомбардировки лунной поверхности, которые прямо или косвенно отражаются в морфологии частиц реголита, являются метаморфизм (катаклаз и перекристаллизация) горных пород, механическое дробление и перемещение обломочного материала, агломерация фрагментов, плавление, испарение и конденсация вещества. Таким образом метеоритная бомбардировка приводит не только к физическим, но также и к химическим изменениям лунных пород.

В основном морфология частиц реголита определяется характером раскалывания фрагментов. Реже встречаются фрагменты (главным образом сферические частицы стекла и металла), морфология которых преимущественно связана с особенностями отвердевания и кристаллизации небольших порций расплавов. Рельеф поверхностей скола кристаллических фрагментов зависит от их структуры и характера спайности слагающих минералов, поскольку раскалывание фрагментов происходит главным образом по контактам минеральных зерен и отчасти по спайности породообразующих минералов. Поверхности скола минеральных зерен в основном связаны с характером спайности, при отсутствии последней образующиеся сколы имеют раковистый характер, наиболее типичный для фрагментов стекла. Поверхности, обра-

зующиеся при отвердевании расплавов, отличаются гладким, ровным характером (в случае стеклянных частиц) или отражают внутреннюю структуру (в случае кристаллизации расплавов, например, для некоторых частиц металлического железа).

Остальные морфологические элементы, хотя и пользуются широким распространением, однако отличаются локальным характером и, как правило, наложены на поверхности скола или отвердевания расплавов. К ним относятся выколки и выбоины, микрократеры, газовые пустоты, трещины, борозды, царапины, набрызги силикатного расплава, полусферические бугорки, элементы скульптуры роста минеральных индивидов, индукционные поверхности и т. д.

Выколки и выбоины являются результатом низкоэнергетических микрометеоритных ударов. На кристаллических фрагментах их морфология в большинстве случаев подчиняется структуре частиц и связана, главным образом, со сколами по границам зерен и спайностью минеральных зерен.

Микрократеры обнаружены на поверхности всех типов частиц реголита, однако их морфология зависит от структуры „мишени" и энергии „снаряда". Низкоскоростные кратеры на поверхности кристаллических фрагментов характеризуются следующими особенностями: ударная воронка часто не отличается правильной округлой формой и имеет мелкобугорчатый рельеф; зона откола не всегда развита, в большинстве случаев характеризуется слабой выраженностью и неправильной формой, которая подчиняется структуре и границам отдельных зерен. Низкоскоростные кратеры, образованные на изотропных стеклянных мишенях, имеют развитые морфологические элементы: воронку чашевидной формы, хорошо выраженный вал и зону откола. Иногда к зоне откола примыкает зона отслаивания. При высокоэнергетических ударах, сопровождающихся плавлением вещества мишени, влияние свойств последней на морфологию кратеров проявляется в значительно меньшей степени. Кратеры, образованные высокоскоростным „снарядом", независимо от свойств мишени, свегда включают основные элементы — оплавленную округлую воронку и оплавленный вал. У кратеров диаметром более 1 мкм часто наблюдается хорошо развитая, концентрическая по отношению к воронке, зона откола, нередко также оплавленная, степень развитости которой возрастает с увеличением размера кратера.

Газовые полости представляют собой вскрытые в процессе ударной эрозии пустоты, заполненные газовой фазой. Они характеризуются правильной округлой формой и ровной гладкой поверхностью и наиболее часто наблюдались на поверхности стеклянных частиц и агглютинатов.

Трещины являются широко распространенным морфологическим элементом на поверхности частиц лунного реголита. Их образование связано как с сокращением объема вещества при кристаллизации расплавов, так и с разнообразными механическими деформациями. Деформационные трещины в кристаллических фрагментах приурочены к контактам минеральных зерен или выра-

жаются в спайности породообразующих минералов. Трещины на изотропных стеклянных поверхностях в связи с локальными ударными деформациями представлены радиальной и концентрической системами. Линейными морфологическими элементами являются также борозды и царапины. Образование таких форм может иметь место при столкновениях частиц в ударно-взрывном облаке или при перемещениях вещества реголита за счет метеоритных ударов и склоновых процессов.

Влияние ударов на рельеф частиц реголита проявляется также в широком развитии на их поверхности набрызгов расплавов, образующихся при ударном плавлении лунных пород. Набрызги имеют неправильные расплывчатые очертания и обладают значительной пористостью, связанной с дегазацией расплава. Форма набрызгов и характер контакта с поверхностью частицы определяются температурой расплава. Горячие расплавы хорошо смачивают поверхность подложки и свободно по ней растекаются. Остывающие расплавы слабо смачивают поверхность подложки или совсем не смачивают.

Косвенным следствием ударно-взрывных процессов является генезис различных новообразований минералов как продуктов конденсации из газовой фазы, образующейся при достаточно мощных метеоритных взрывах, а также продуктов ударного переплавления и перекристаллизации лунного вещества. На поверхности частиц реголита такие новообразования представленны главным образом сферическими и полусферическими выделениями силикатного или Fe-Ni состава, которые наиболее часто встречаются на поверхностях стеклянных сферул и набрызгов ударного расплава. Кроме того, в некоторых случаях наблюдались мелкие кристаллики металлического железа и силикатов, образование которых также может быть связано с экзогенными процессами.

Хорошо ограненные кристаллы минералов в изученном материале не обнаружены. В единичных случаях наблюдались только отдельные элементы кристаллографической огранки, на которых были диагностированы ступени роста, а также индукционные поверхности.

В целом морфология частиц лунного реголита зависит от их химического и минерального состава, структуры, условий образования, а также от эффективности и характера воздействия экзогенных факторов. В связи с этим исследования морфологии частиц реголита имеет большое значение для понимания интенсивности, характера и роли ударно-взрывных процессов в геологической истории Луны.

REFERENCES
ЛИТЕРАТУРА

BLANFORD G. E., FRULAND R. M., MCKAY D. S., MORRISON D. A. (1974): Lunar surface phenomena: solar flare track gradients microcraters, and accretionary particles. — Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 2501—2526. New York.

BLOCH M. R., FECHTIG H., GENTNER W., NEUKUM G., SCHNEIDER E. (1971): Meteorite impact craters, crater simulations, and the meteoroid flux in the early solar system. — Proc. Second Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 2639—2652. New York.

CARTER J. L., MACGREGOR I. D. (1970): Mineralogy, petrology and surface features of lunar samples 10062,35; 10067,9, 10069,30 and 10085,16. — Science, Vol. 167, No. 3918, 661—663. Washington.

CARTER J. L. MACGREGOR I. D. (1970): Mineralogy, petrology and surface features of some Apollo 11 samples. — Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 247—265. New York.

CARTER J. L. (1971): Chemistry and surface morphology of fragments from Apollo 12 soil. — Proc. Second Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 873—892. New York.

CARTER J. L., MCKAY D. S. (1972): Metallic mounds produced by reduction of material of simulated lunar composition and implications on the origin of metallic mounds on lunar glasses. — Proc. Third Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 953—970. New York.

CARTER J. L. (1973): Chemistry and surface morphology of soil particles from Luna 20 LRL sample 22003. — Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 37, No. 4, 795—803. New York.

CARTER J. L., PADOVANI E. (1973): Genetic implications of some unusual particles in Apollo 16 less than 1 mm fines 68841,11 and 69941,13. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Vol. 1 323—332. New York.

CARTER J. L. (1973): Morphology and chemistry of probably VLS (Vapor-Liquid-Solid) type of whisker structures and other features on the surface of breccia 15015,36. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 413—421. New York.

CARTER J. L. (1973): VLS (Vapor-Liquid-Solid): newly discovered growth mechanism of the lunar surface. — Science, Vol. 181, No. 4102, 841—842. Washington.

CARTER J. L., CLANTON U. S., FUHRMAN R., LAUGHON R. B., MCKAY D. S., USSELMAN T. M. (1975): Morphology and composition of chalcopyrite, chromite, Cu, Ni-Fe pentlandite and troilite in vugs of 76015 and 76215. — Proc. Sixth Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 719—728. New York.

CAVARRETTA G., CORADINI A., FUNICIELLO R., FULCHIGNONI M., TADDEUCCI A., TRIGILA R. (1972): Glassy particles in Apollo 14 soil 14163, 88: peculiarities and genetic considerations. — Proc. Third Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 1085—1094. New York.

CHAO E. C. T., BOREMAN J. A. (1971): The petrology of unshocked and shocked Apollo 11 and Apollo 12 microbreccias. — Proc. Second Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 797—816. New York.

CHERC F., MORRISON D. A., GOLT D. E., OBERBEK V. R., KVAJD V. L., VEDDER D. F., BROUNLI D. E., CHARTUNG D. B. (1975): Mikrometeoritnyj kompleks i ėvoljucija lunnogo regolita. — Sb. „Kosmochimija Luny i planet", Nauka, 473—500. Moskva.

CLANTON U. S., MCKAY D. S., LAUGHON R. B., LADLE G. H. (1973): Iron crystals in lunar breccias. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 925—931. New York.

CLANTON U. S., MCKAY D. S., LAUGHON R. B., LADLE G. H. (1974): Vapor-phase cristallization of iron in lunar breccias. — Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 621—626. New York.

CLANTON U. S., MCKAY D. S., LEDLE G. H. (1973): Scanning electron microscopy of lunar material. — Jeol News, Vol. 11, No. 2.

DURRANI S. A., KHAN H. A., BULL R. K., DORLING G. W., FREMLIN J. H. (1974): Charged particle and micrometeorite impacts on the lunar surface. — Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 2543—2560. New York.

FECHTIG G., GEJTNER V., CHARTUNG D. B., NAGEL' K., NOJKUM G., ŠNEJDER E., ŠTORCER D. (1975): Mikrokratery na lunnych obrazcach. — Sb. „Kosmochimija Luny i planet", Nauka, 453—472. Moskva.

FECHTIG H., HARTUNG J. B., NAGEL K., NEUKUM G., STORZER D. (1974): Lunar microcrater studies derived meteoroid fluxes and comparison with satellite-borne experiments. — Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 2463—2474. New York.

FLORENSKIJ K. P., RODE O. D., IVANOV A. V. (1974): Mikrokratery na poverchnosti stekljannych sferičeskich častic lunnogo grunta. — Geochimija, No. 5, 688—692. Moskva.

FLORENSKIJ K. P., RODE O. D., IVANOV A. V., BOČKO R. A. (1973): Issledovanije mikromorfologii častic lunnogo grunta metodom rastrovoj elektronnoj mikroskopii. — Kosmičeskije issledovanija, t. XI, vyp. 6, 933—939. Moskva.

FLORENSKIJ K. P., IVANOV A. V., TARASOV L. S., STACHEEV JU. I., RODE O. D. (1974): Morfologija i tipy častic obrazca regolita iz Morja Izobilija. — Sb. „Lunnyj grunt iz Morja Izobilija", Nauka, 38—43. Moskva.

FRONDEL C., KLEIN C., ITO J., DRAKE J. C. (1970): Mineralogical and chemical studies of Apollo 11 lunar fines and selected rocks. — Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Vol. 1. 445—447, New York.

FULCHIGNONI M., FUNICIELLO R., TADDEUCCI A., TRIGILA R. (1971): Glassy spheroids in lunar fines from Apollo 12 samples 12070,37; 12001,73; and 12057,60. — Proc. Second Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 937—948. New York.

GOLDSTEIN J. I., AXON H. J., AGRELL S. O. (1975): The grape cluster, metal particle 63344,1. — Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 28, No. 2, 217—224. Amsterdam.

GOLDSTEIN J. I., HENDERSON E. P., YAKOWITZ H. (1970): Investigation of lunar metal particles. — Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 499—512. New York.

HARTUNG J. B., HODGES F., HÖRZ F., STORZER D. (1975): Microcrater investigations on lunar rock 12002. — Proc. Sixth Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 3351—3371. New York.

HARTUNG J. B., HÖRZ F., MCKAY D. S., BAIAMONTE F. L. (1972): Surface features on glass spherules from the Luna 16 sample. — Moon, Vol. 5, No. 3/4, 436—446. Dordrecht.

HÖRZ F., HARTUNG J. B., GAULT D. E. (1971): Micrometeorite craters on lunar rock surfaces. — J. Geophys. Res., Vol. 76, No. 23, 5770—5798. Richmond, Va.

HOUSLEY R. M., CERLIN E. H., PATON N. E., GOLDBERG J. B. (1974): Solar wind and micrometeorite alteration of the lunar regolith. — Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 2623—2664. New York.

JEDWAB J. (1971): Surface morphology of free-growing ilmenites and chromites from vuggy rocks 10072,31 and 12036,2. — Proc. Second Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 923—935. New York.

JEDWAB J. (1973): Rare micron-size minerals in lunar fines. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 861—874. New York.

KLEIN J. K., DRAKE J. C. (1972): Mineralogy, petrology, and surface features of some fragmental material from the Fra Mauro site. — Proc. Third Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 1095—1113. New York.

MANDEVILLE J. C., VEDDER J. F. (1971): Microcraters formed in glass by low density projectiles. — Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 11, 297—306. Amsterdam.

MARGOLIS S. V., BARNES V., CLOUD P., FISHER R. V. (1971): Surface micrography of lunar fines compared with tektites and terrestrial volcanic analogs. — Proc. Second Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 909—921. New York.

McKay D. S., Greenwood W. R., Morrison D. A. (1970): Origin of small lunar particles and breccia from the Apollo 11 site. — Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 673—694. New York.

McKay D. S., Clanton U. S., Morrison D. A., Ladle G. H. (1972): Vapor phase crystallization in Apollo 14 breccia. — Proc. Third Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 739—752. New York.

McKay D. S., Clanton U. S., Ladle G. (1973): Scanning electron microscope study of Apollo 15 green glass. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Vol. 1, 225—238. New York.

Morrisón D. A. McKay D. S., Fruland R. M., Moore H. J. (1973): Microcraters on Apollo 15 and 16 rocks. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 3235—3253. New York.

Rode O. D., Ivanov A. V. (1974): Morfologie a geneze negativních tvarů reliéfu na povrchu skleněných kuliček z měsíčního regolitu Luny 16 a Luny 20. — Čas. mineral. geol., Vol. 19, No. 4, 337—344. Praha.

Rode O. D., Ivanov A. V., Florenskij K. P., Bočko R. A., Kuzmin V. A. (1975): Mikromorfologija poverchnosti stekljannych sferičeskich častic lunnogo regolita. — Izvestija AN SSSR, ser. geol., No. 3, 18—28. Moskva.

Rode O. D., Ivanov A. V., Cimbálníková A. (1979): Charakter poverchnosti častic lunnogo regolita. — Sb. „Grunt iz materikovogo rajona Luny", Nauka. Moskva.

Schneider E., Storzer D., Hartung J. B., Fechtig H., Gentner W. (1973): Microcraters on Apollo 15 and 16 samples and corresponding cosmic dust fluxes. — Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Vol. 3, 3377—3290. New York.

Tarasov L. S., Florenskij K. P., Ivanov A. V., Rode O. D. (1973): Morfologičeskije osobennosti i tipy častic regolita, dostavlennogo avtomatičeskoj stancijej „Luna-20" iz materikovogo rajona Luny. — Geochimija, No. 9, 1175—1186. Moskva.

Vedder J. F. (1971): Microcraters in glass and minerals. — Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 11, No. 4, 291—296. Amsterdam.

Vinogradov A. P. (1971): Predvaritel'nyje dannyje o lunnom grunte, dostavlennom avtomatičeskoj stancijej „Luna-16". — Geochimija, No. 3, 261—273. Moskva.

Watts R. N. (1973): Orange soil and other Apollo 17 results. — Sky and Telescope, Vol. 45, No. 3, 146—148.

PHOTOGRAPHS
ФОТОГРАФИИ

PRIMARY MAGMATIC ROCKS AND MINERAL GRAINS
ПЕРВИЧНЫЕ МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ ЗЕРНА

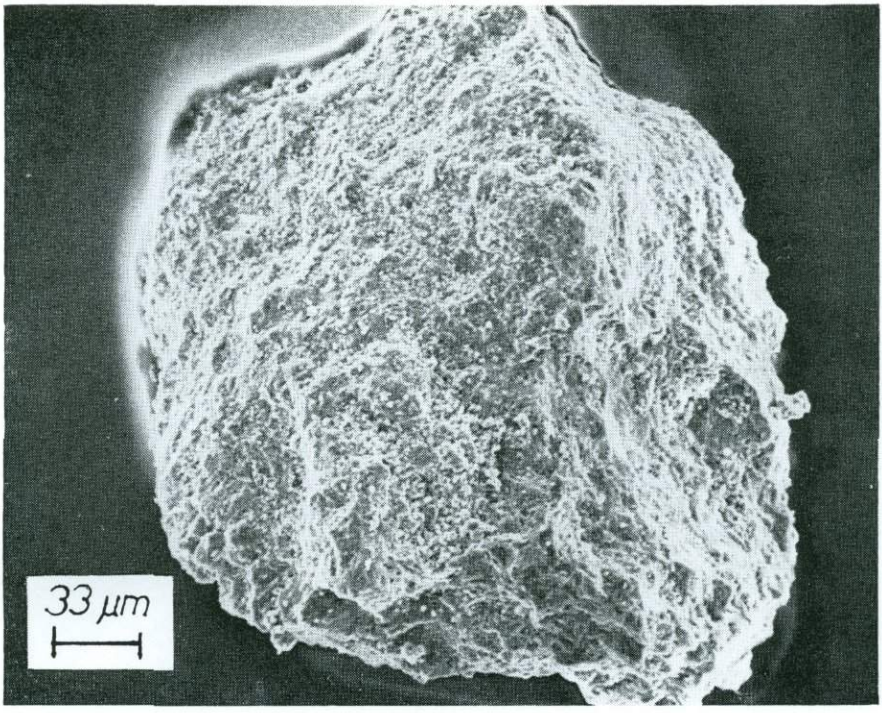
Basaltic rocks
Породы базальтового типа

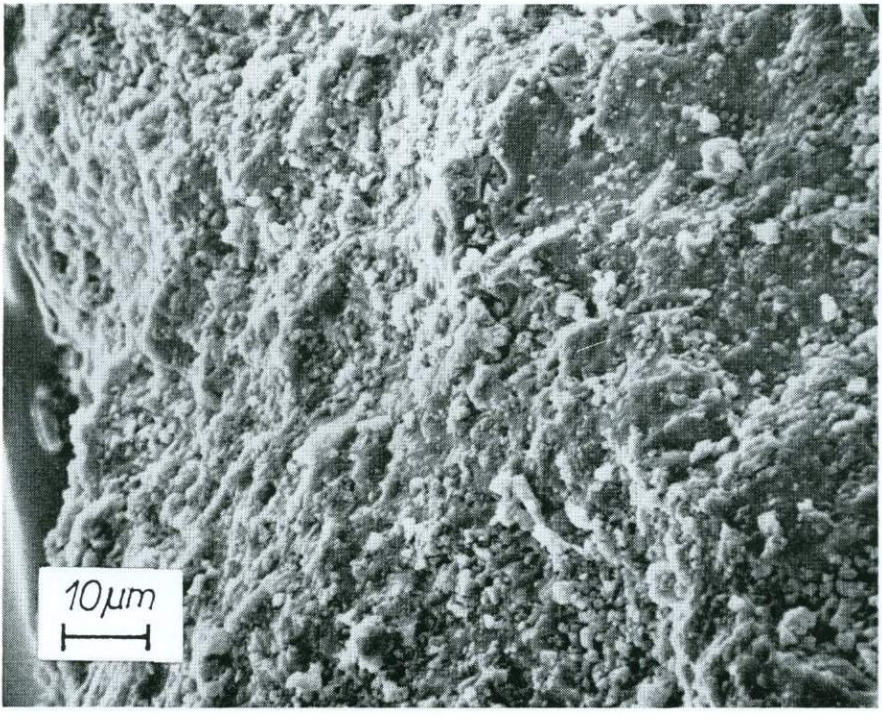
1. Subrounded fragment of fine-grained mare basalt with numerous impact craters, pits and holes on its surface. The general view of the fragment and impact features suggest its intensive exogenic reworking. Luna 20.

1. *Общий вид обломка микрозернистого морского базальта. Фрагмент* характеризуется довольно мягкими очертаниями, присутствием на поверхности многочисленных ударных кратеров, лунок, выбоин. Общая сглаженность формы фрагмента, а также наличие ударных дефектов свидетельствуют о том, что фрагмент в течение своей геологической истории подвергался интенсивной экзогенной переработке. „Луна-20".

2. *Enlarged detail of central left of Fig. 1. The hummocky surface of basalt fragment* shows traces of impacts, accompanied by partial melting (see glass at the right). Note a shallow circular impact crater in the center. Luna 20.

2. Увеличенное изображение левой средней части рис. 1. На фоне неровной шероховатой поверхности базальтового фрагмента заметны следы многочисленных ударов, которые сопровождались частичным остеклованием поверхности (правая верхняя часть снимка). В центре снимка выделяется неглубокий ударный кратер округлой формы. „Луна-20".


33 μm

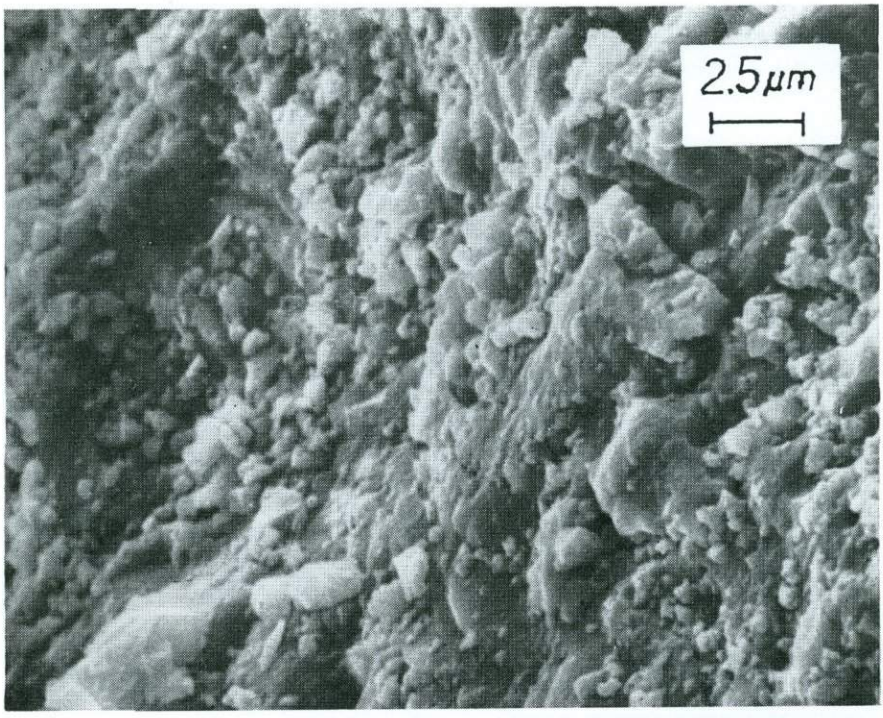

10μm

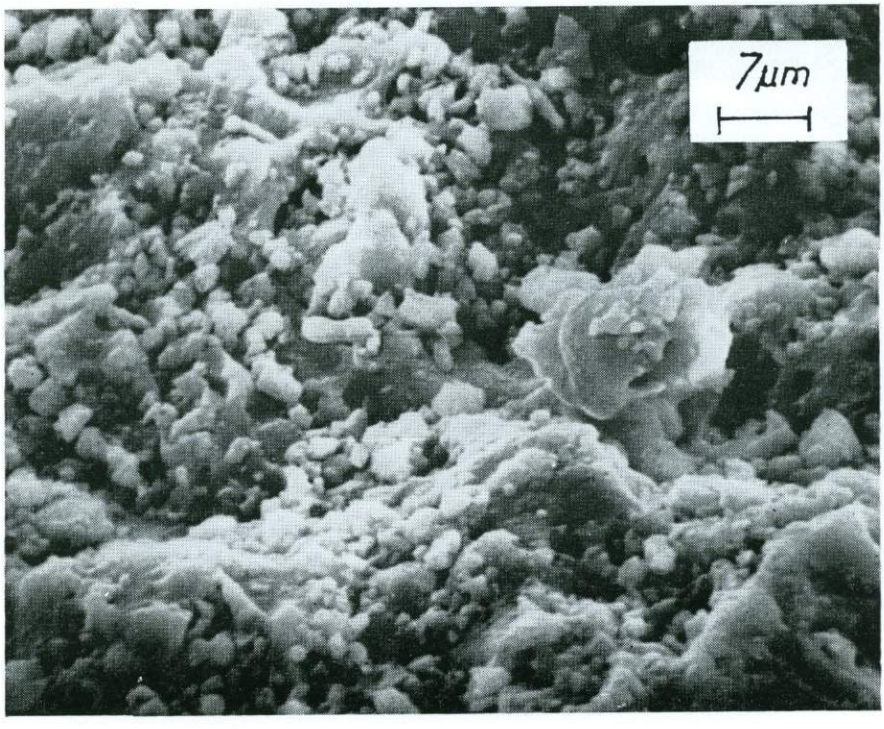
3. Enlarged view of impact crater (central part of Fig. 2). Melting of the target caused by impact is indicated by partly melted bottom, walls and rim of the crater and by the splashes on the surface of the basalt fragment, which were ejected from the crater on impact. Luna 20.

3. Увеличенное изображение ударного кратера (центральная часть рис. 2). Удар, образовавший кратер, сопровождался плавлением вещества мишени, на что указывают оплавленный характер дна, стенок и вала, а также набрызги расплавленного на поверхности базальта материала, выброшенного из кратера при его образовании. „Луна-20".

4. Enlarged central part of Fig. 1 showing the character of a mare basalt fragment, which suffered intensive exogenic reworking and general melting of the surface. An impact crater is seen of the left. Luna 20.

4. Увеличенное изображение центральной части рис. 1, демонстрирующее характер поверхности фрагмента морского базальта, подвергшегося интенсивной экзогенной переработке. Хорошо заметна общая остеклованность поверхности. *В левой части рисунка ясно виден ударный кратер.* „Луна-20".


2.5μm

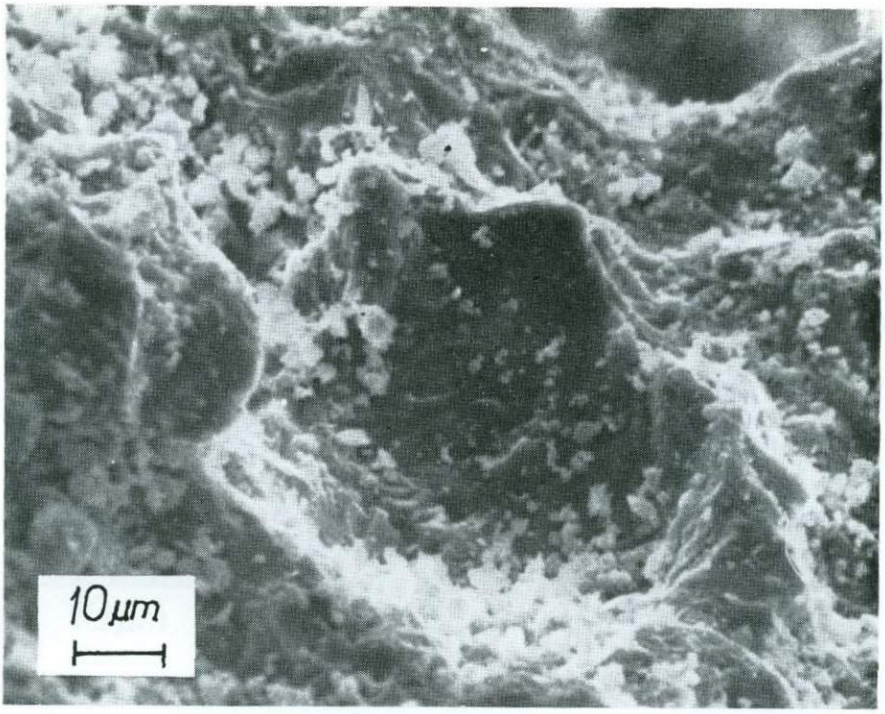

7μm

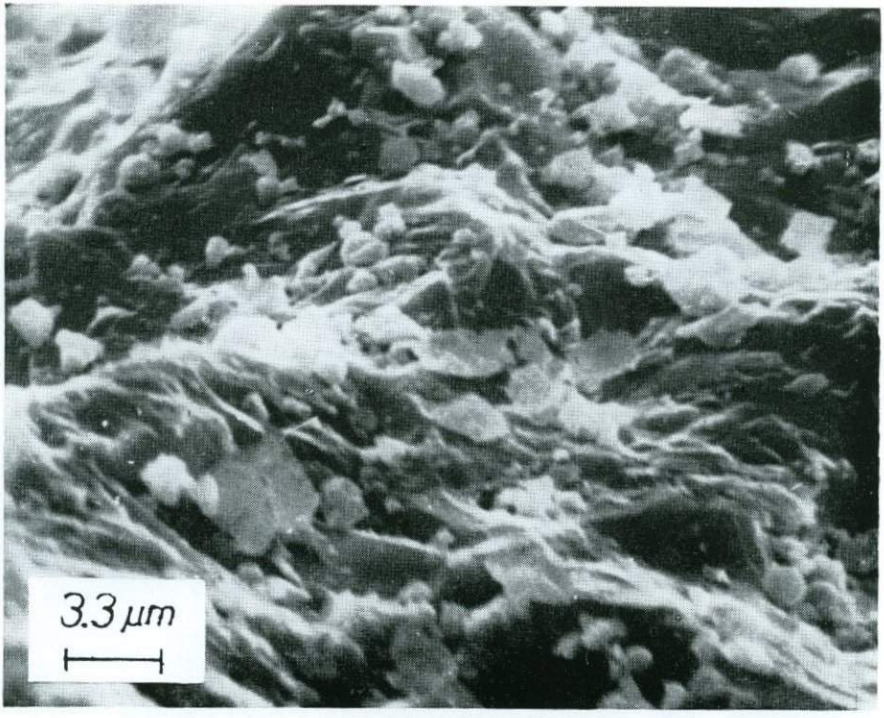
5. A relatively deep impact crater on the surface of a basalt fragment. The crater pit shows features of melting. The well marked, partly melted rim of irregular shape is destroyed in places. Luna 16.

5. Относительно глубокий ударный кратер на поверхности фрагмента базальта. Воронка кратера несет заметные следы оплавления. Хорошо выраженный, местами оплавленный вал, имеющий неправильную форму, частично разрушен. „Луна-16".

6. Typical view of mare basalt surface. Its fine, hummocky relief is due to the fine-grained texture of basalt and to the character of the surfaces of individual rock-forming minerals. Luna 16.

6. Типичный участок поверхности морского базальта. Хорошо заметен его неровный мелкобугорчатый рельеф, обусловленный мелкозернистой структурой породы и характером поверхности слагающих ее минеральных зерен. „Луна-16".


10 μm

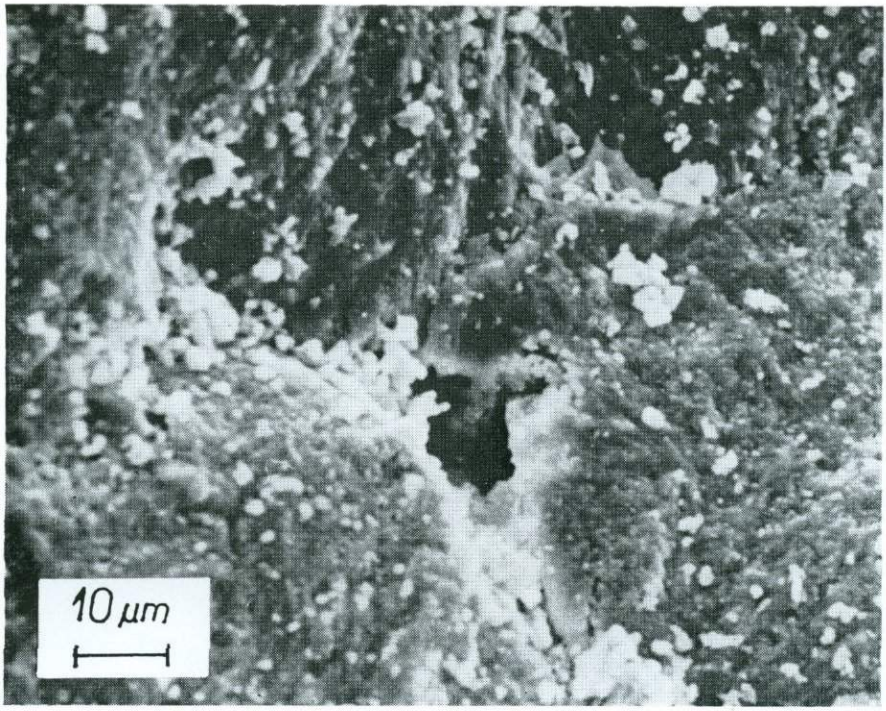

3.3 μm

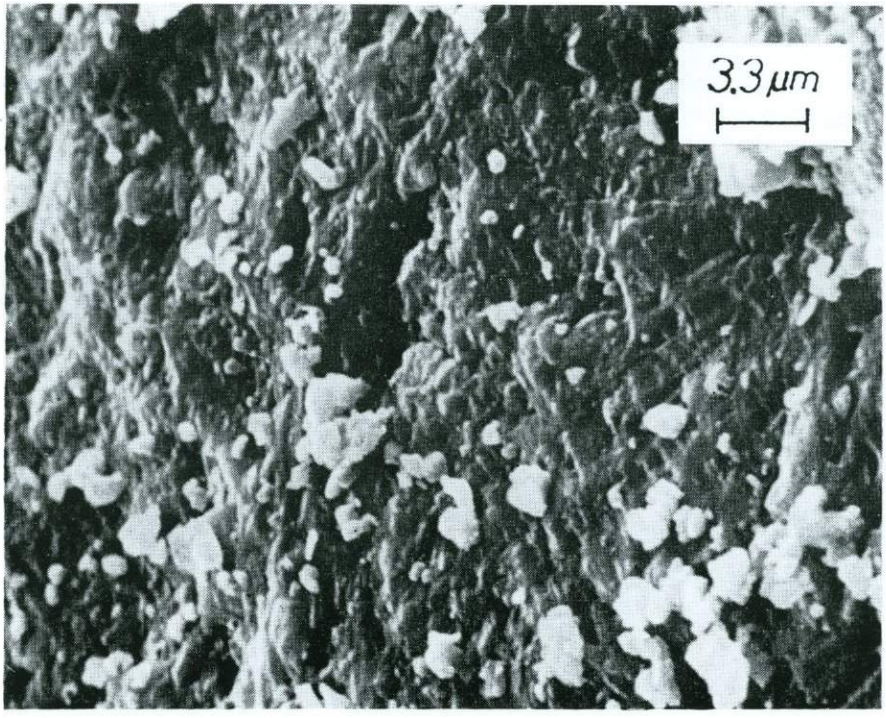
7. Part of a basalt fragment surface with distinct zoning, which reflects inhomogeneous structure of the rock. The fracture following the contact between different structural zones is due either to impact processes or to abrupt temperature changes during the cooling of the basalt magma. The irregularly shaped vug in the center is probably an exposed outgassing cavity. Luna 20.

7. Участок поверхности фрагмента базальта с хорошо выделяющимися отдельными зонами, отражающими неоднородную структуру породы. Трещина, пересекающая частицу, приурочена к контакту слагающих породу структурных зон. Образование трещины может быть связано либо с ударными явлениями, либо с резкими изменениями температуры при остывании базальтовой магмы. В центре снимка — пустота с резкими неровными очертаниями, представляющая собой, по-видимому, вскрытую газовую полость. „Луна-20".

8. Surface of mare basalt fragment intensely reworked by exogenic agents, as evidenced by numerous crater-like depressions and by traces of melting. Note the outgassing structure in the center. Luna 20.

8. Участок поверхности фрагмента морского базальта, подвергшегося интенсивной экзогенной переработке, о чем свидетельствуют многочисленные кратероподобные депрессии и следы оплавления. В центре снимка — вскрытая пора. „Луна-20".


10 μm

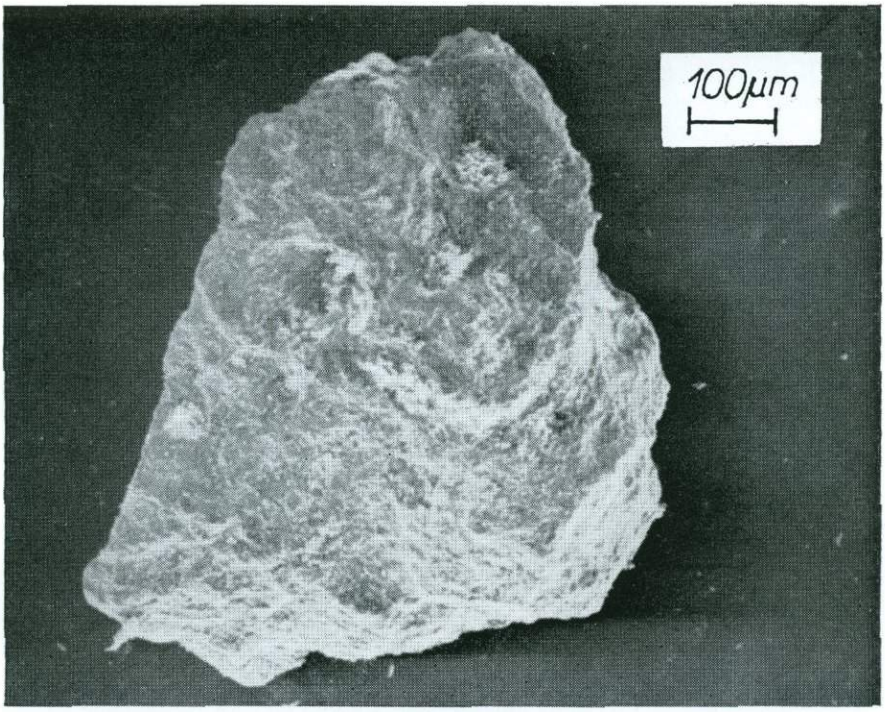

3.3 μm

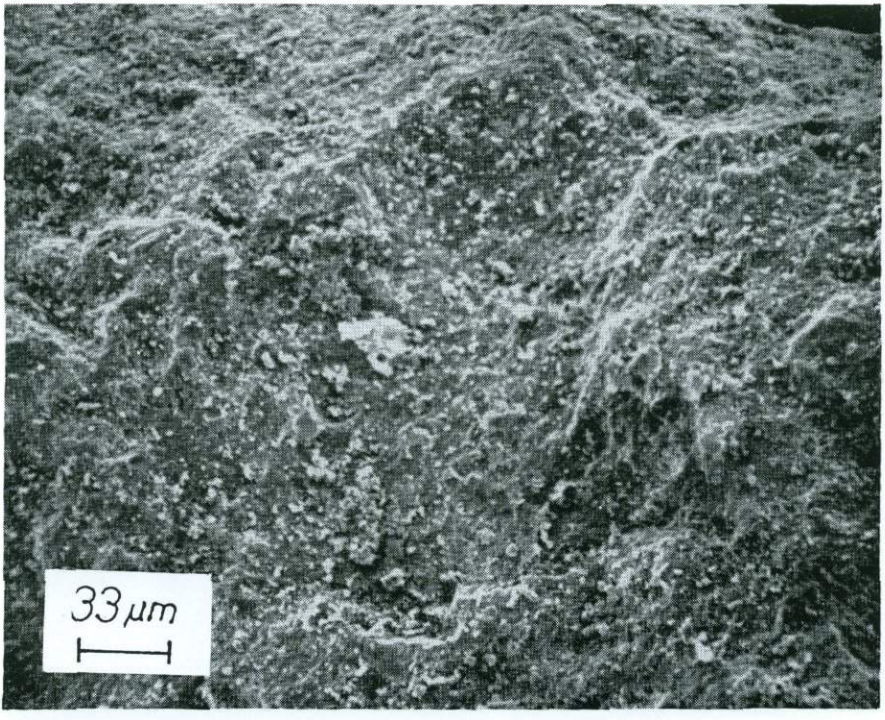
9. Fragment of mare basalt of angular and irregular shape, indicating traces of impact events. Luna 16.

9. Обломок морского базальта неправильной угловатой формы со следами ударного воздействия. „Луна-16".

10. Enlarged upper part of Fig. 9. The surface structure with sharp chip surfaces is characteristic of lunar basaltic rocks. Luna 16.

10. Увеличенное изображение верхней части рис. 9. Структура поверхности с резкими гранями сколов является весьма характерной для базальтовых пород Луны. „Луна-16".


100μm

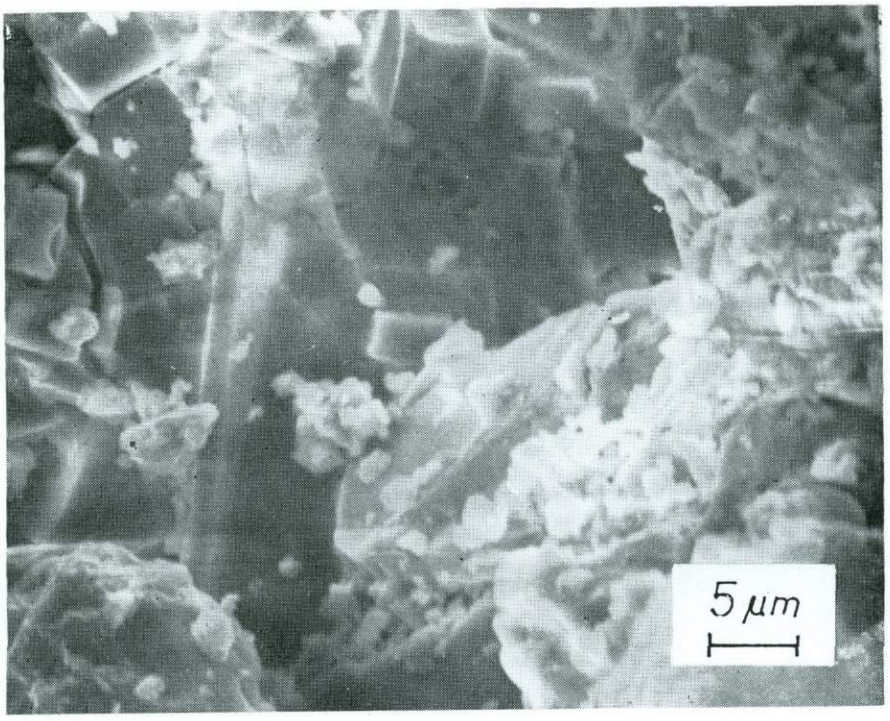

33μm

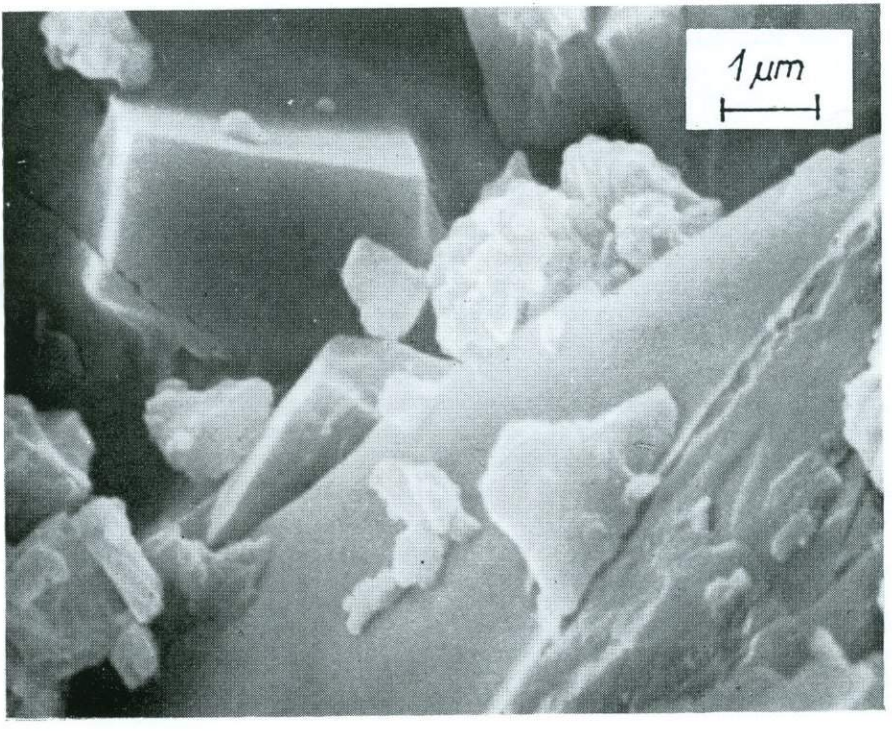
11. Enlarged central part of Fig. 9 showing a cavity, which was exposed by rock fragmentation. Well developed mineral crystals seen in the cavity are likely to have formed either by condensation from the gaseous phase (generated at large-scale impact events) or during crystallization of magma. Luna 16.

11. *Центральная часть рис. 9 при большом увеличении. Видна вскрытая при* дроблении породы полость с хорошо выраженными кристаллами минералов, образовавшимися, вероятно, либо в результате конденсации из газовой фазы при ударных событиях большого масштаба, либо в процессе кристаллизации магмы. „Луна-16".

12. Enlarged detail of the cavity shown in Fig. 11. Euhedral crystal on the upper left belongs to Mg-Fe silicate, possibly pyroxene or olivine. Analogous crystals occur on other cavity walls. Luna 16.

12. Увеличенное изображение участка полости, представленной на рис. 11. В центре снимка — идиоморфный кристалл магнезиально-железистого силиката. Предположительно, данный минерал является пироксеном или оливином. Подобные кристаллы находятся на всех стенках полости. „Луна-16".


5 μm


1 μm

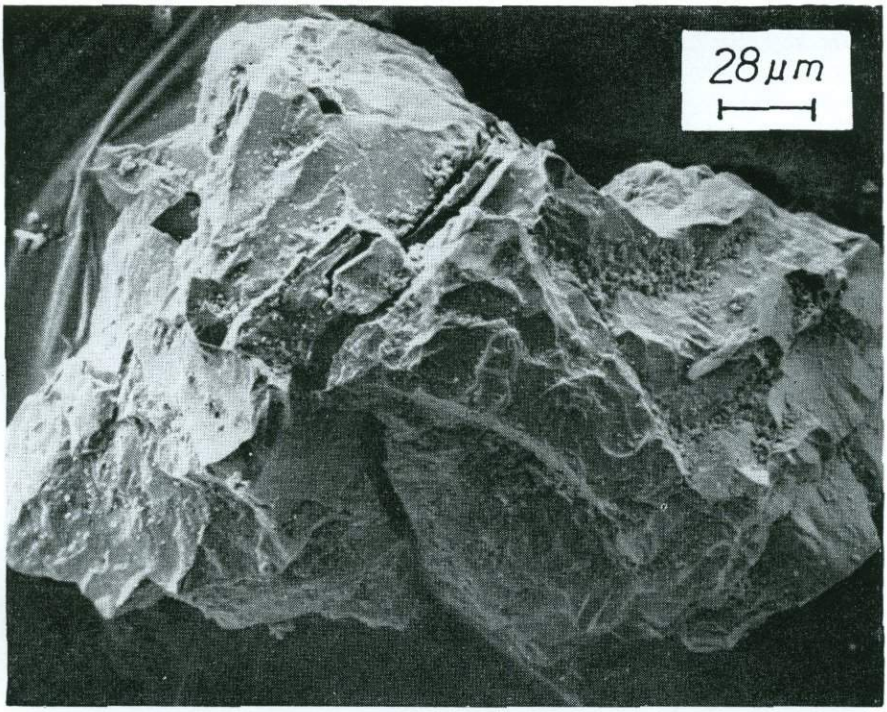
Gabbroid rocks
Породы габброидного типа

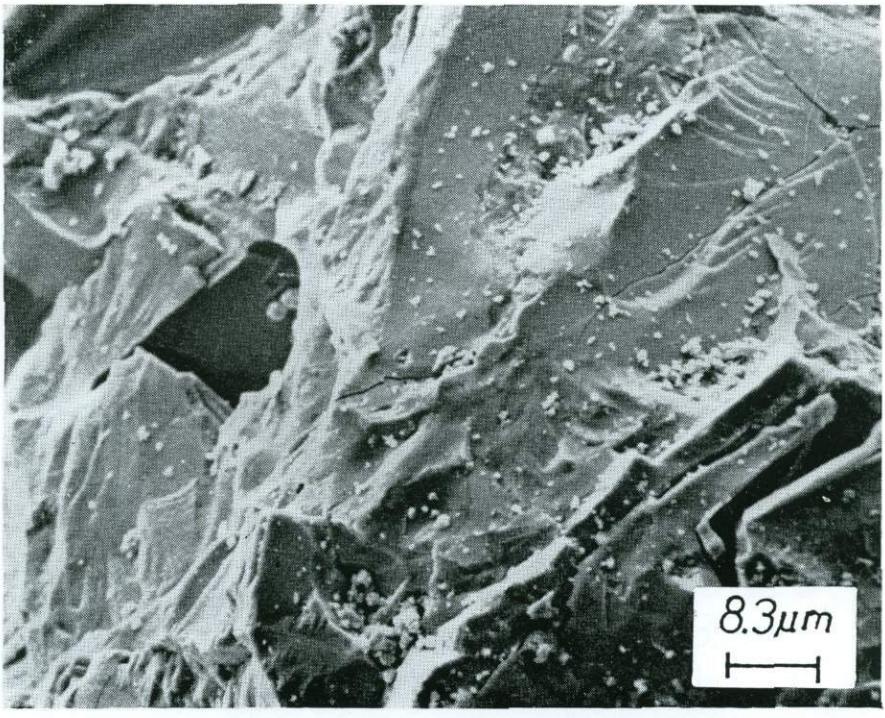
13. Microgabbro fragment of irregular shape; uneven surface of the fragment is controlled by the morphology of rock-forming minerals. Luna 16.

13. Фрагмент микрогаббро неправильной формы с неровной поверхностью, элементы которой определяются рельефом слагающих габбро минералов. „Луна-16".

14. Enlarged upper left portion of microgabbro fragment shown in Fig. 13. Distinct subhedral plagioclase laths (particularly in the upper part) are characterized by a relatively smooth surface. Pyroxene in interstices between plagioclases shows uneven undulated relief. Note a subhedral tabular ilmenite crystal at the bottom of the figure and a minor impact deformation, from which thin cracks radiate, in the upper right-hand corner. The outline of the pore on the left indicates that a mineral grain had fallen out from it. Luna 16.

14. Ивеличенное изображение левой верхней части фрагмента габбро (рис. 13). Отчетливо выражены гипидиоморфные лейсты плагиоклаза (особенно в верхней части снимка) с довольно гладкой поверхностью, в интерстициях между которыми находится пироксен, характеризующийся ребристым, волнистым рельефом. В нижней части снимка гипидиоморфный таблитчатый кристалл ильменита. Конфигурация пор, заметно выделяющихся на поверхности фрагмента, указывает на то, что они образовались при выкрашивании минеральных зерен из породы. Справа вверху небольшая ударная деформация с радиально расходящимися от нее трещинами. „Луна-16".


28 μm

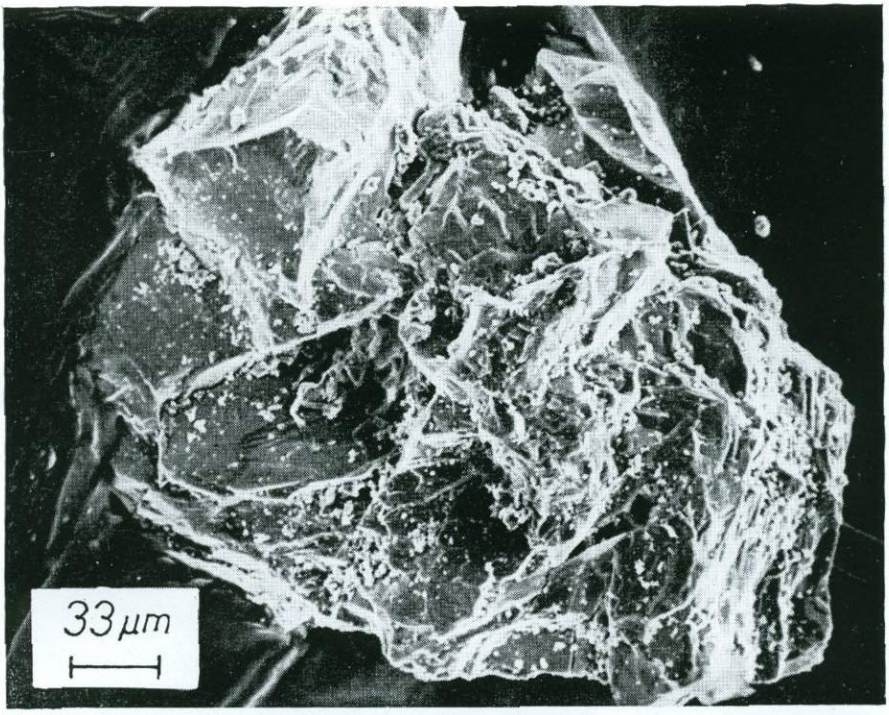

8.3μm

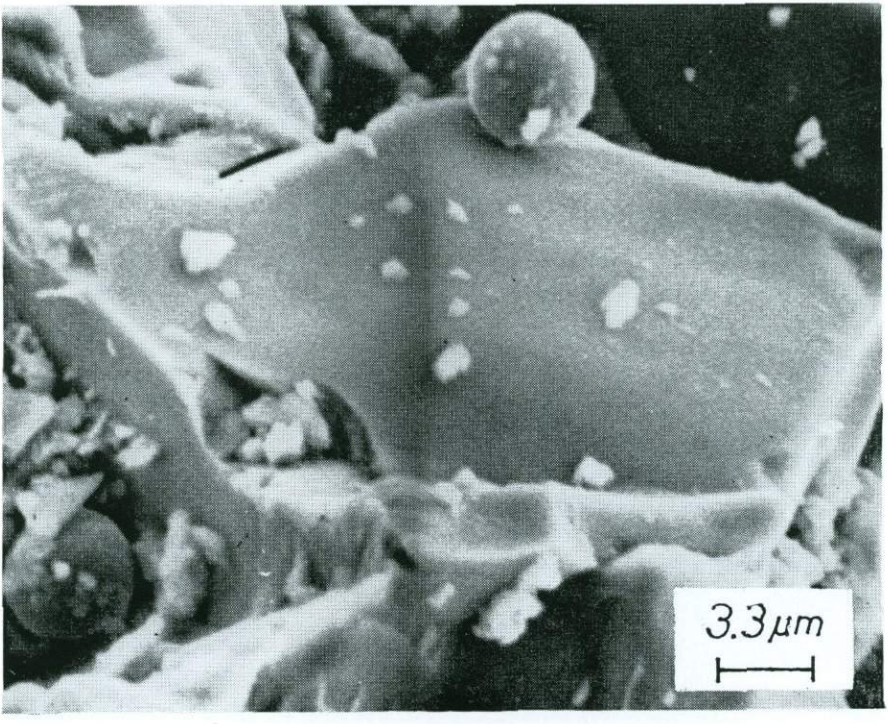
15. Microgabbro fragment of irregular shape and equigranular texture. The rock consists predominantly of subhedral pyroxene grains. Shock effects — minor pits and chip surfaces — are seen in the central part. The whole surface is transected by fine cracks. Luna 16.

15. Фрагмент габбро неправильной формы, характеризующийся равномернозернистой структурой. Габбро сложено гипидиоморфными зернами, главным образом, пироксена. В средней части габбро заметны щоковые эффекты — мелкие выбоины и сколы. Для всей поверхности фрагмента характерным элементом являются тонкие трещины. „Луна-16".

16. Enlarged upper right portion of Fig. 15. The microgabbro surface is relatively fresh. The main object of the photo is the pyroxene grain with attached silicate spherule. Another silicate spherule is seen in the cavity (lower left corner). Luna 16.

16. Увеличенное изображение верхней правой части рис. 15. Поверхность демонстрируемого участка габбро относительно свежая. На переднем плане зерно пироксена с прилипшим к нему силикатным шариком. В полости (слева снизу) другой силикатный шарик. „Луна-16".


33 μm

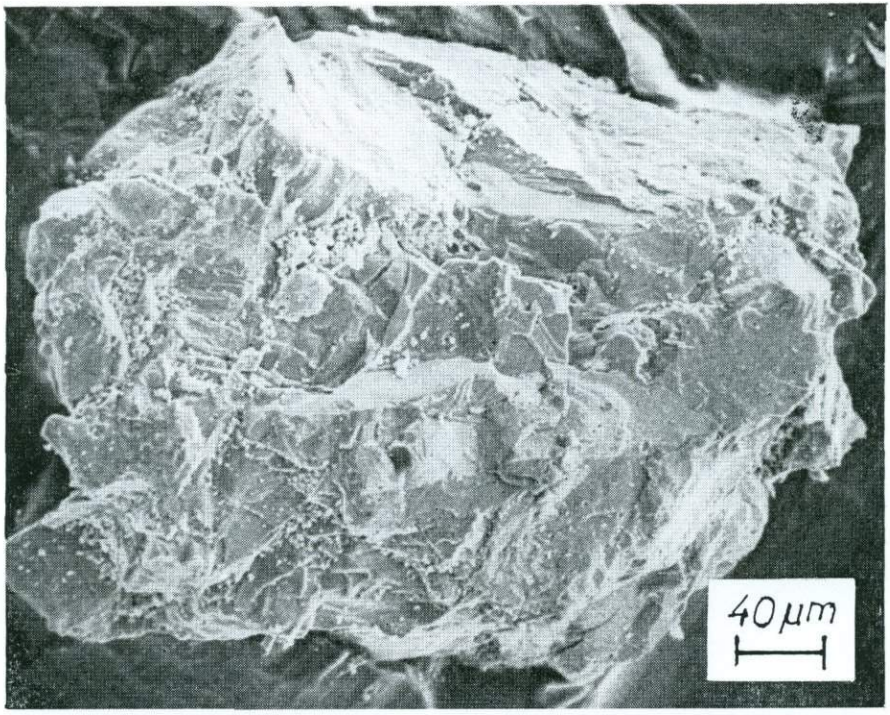

3.3 μm

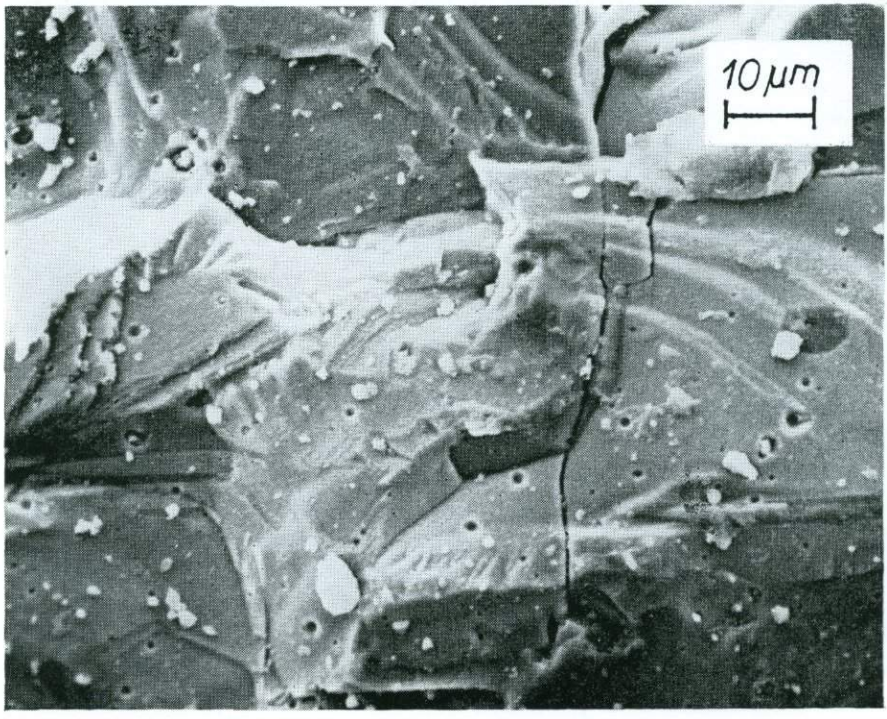
17. Microgabbro fragment characterized by irregular angular form and uneven surface with numerous step-like and conchoidal chip surfaces. Luna 16.

17. Общий вид фрагмента габбро неправильной формы с резкими угловатыми очертаниями, с неровной поверхностью, характеризующейся ступенчатыми и раковистыми сколами. „Луна-16".

18. Enlarged right-hand portion of microgabbro fragment shown in Fig. 17. Abundance of microcraters (about 1 μm in diameter) suggests intensive micrometeoritic bombardment of the fragment. Note the diverse density of microcraters in some parts, which is due to repeated origin of fresh surfaces as a result of the non-uniform destruction of the sample, and which indicates different exposure time of its parts. Luna 16.

18. Участок поверхности микрогаббро, представленного на рис. 17 (увеличенное изображение правой части). Наличие многочисленных микрократеров размером около 1 мкм свидетельствует о том, что частица подверглась интенсивной микрометеоритной бомбардировке. Следует отметить разную плотность микрократеров на отдельных участках породы, что связано с периодическим образованием свежих поверхностей при разрушении зерен и является показателем различного экспозиционного возраста этих участков. „Луна-16".


40 μm

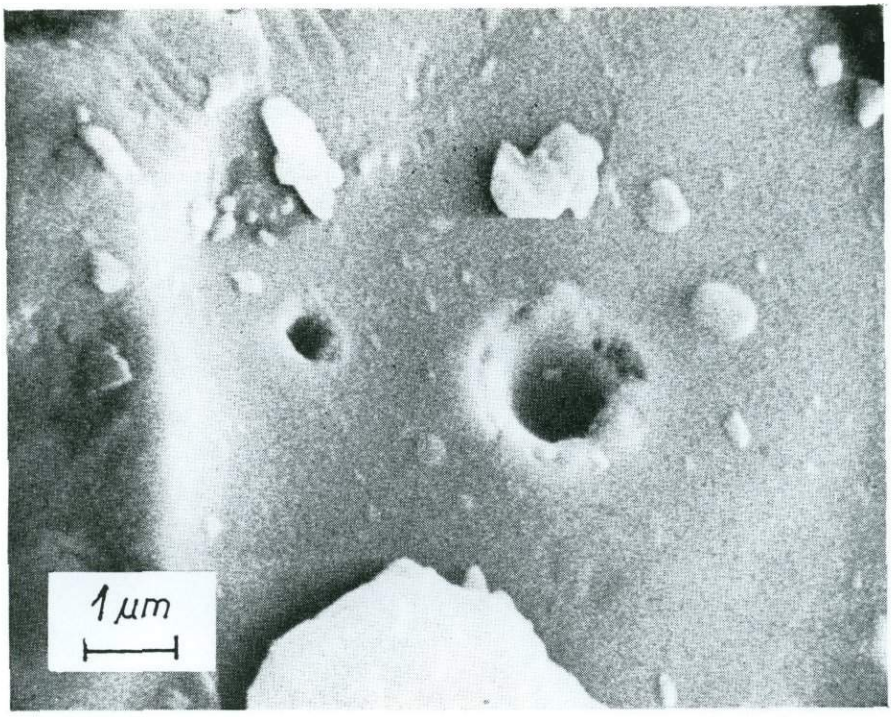

10 μm

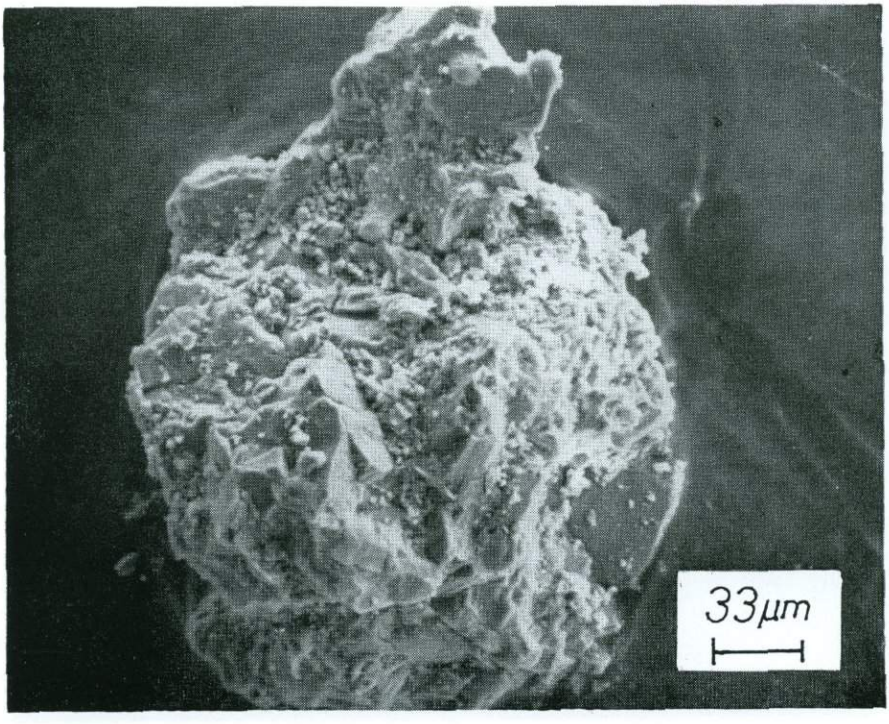
19. Microcraters on the surface of microgabbro in Figs. 17 and 18 (enlarged). The characteristic features of the structure (partial melting of the central pit and rim and the high depth to diameter ratio) suggest that the craters were produced by high-velocity micrometeoritic impacts. Luna 16.

19. Увеличенное изображение микрократеров на поверхности габбро (рис. 17 и 18). Детали строения кратеров — оплавленность воронки и вала, значительное отношение глубины к диаметру — позволяют предполагать высокую скорость удара микрометеоритных частиц, вызвавших образование кратеров. „Луна-16".

20. Microgabbro fragment of irregular shape. Numerous cracks, fractures and spall surfaces provide evidence of strong impacting. Luna 20.

20. Фрагмент габбро неправильной формы. Многочисленные трещины, сколы и выбоины на поверхности указывают на ее интенсивную ударную переработку. „Луна-20".


1 μm

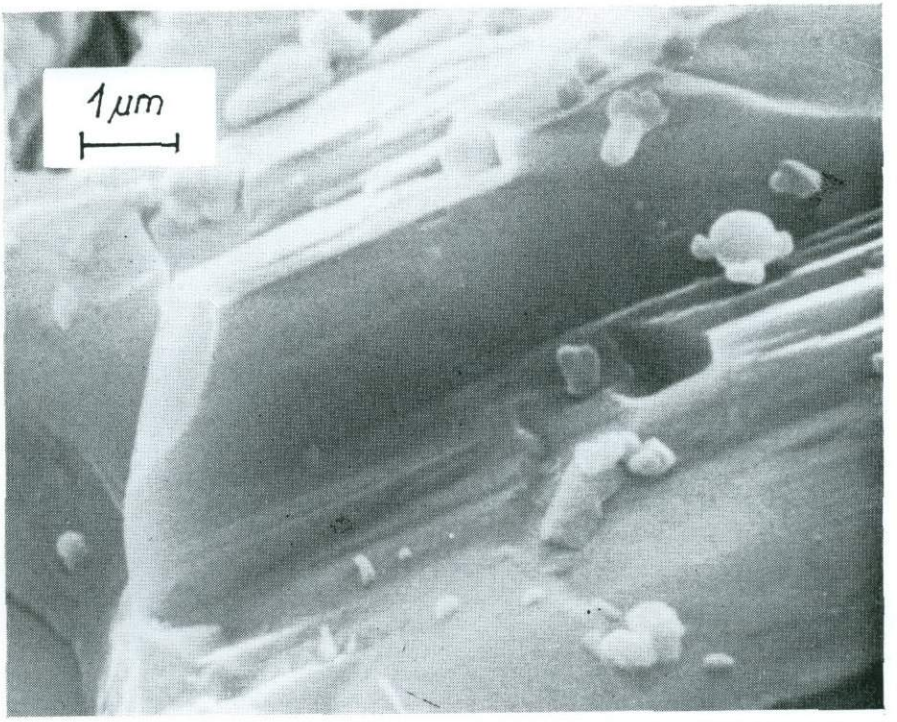

33μm

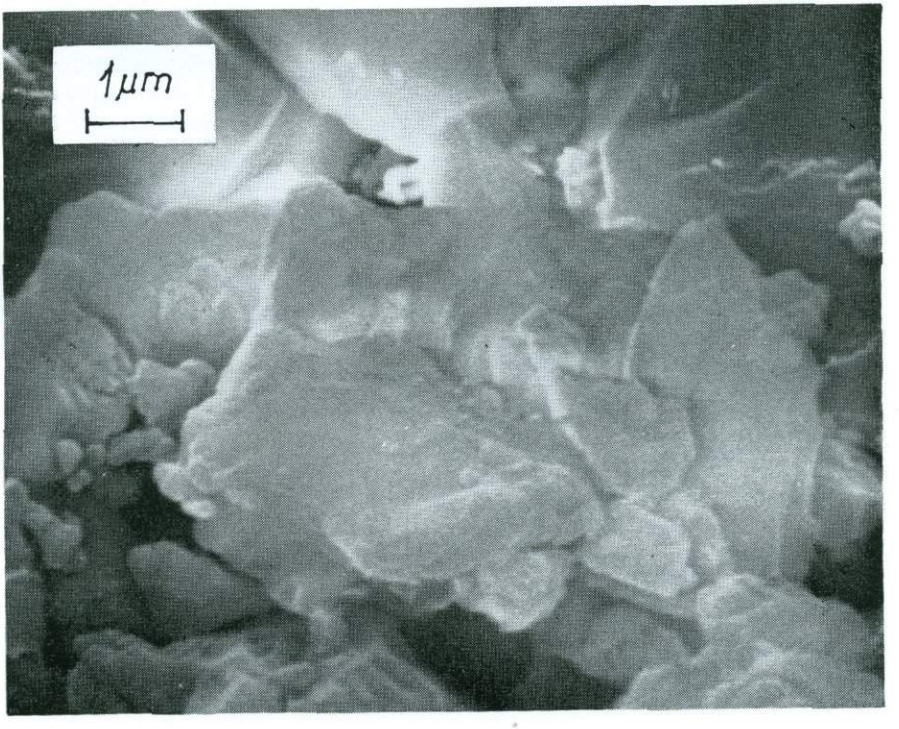
21. Enlarged detail of microgabbro shown in Fig. 20. A fresh wedge-shaped chip is seen at the boundary between mineral grains. The greater part of the photo is occupied by a pyroxene grain whose step-like surface structure is caused by the joint growth of pyroxene and plagioclase. Luna 20.

21. Увеличенное изображение участка габбро (рис. 20) — свежая выколка по границе зерен минералов. Большую часть снимка занимает зерно пироксена со ступенчатой поверхностной структурой совместного роста пироксен-плагиоклаз. „Луна-20".

22. Enlarged detail of microgabbro fragment (Fig. 20) illustrating a strongly reworked part consisting of flattened plagioclase grains. Luna 20.

22. *Увеличенное изображение участка габбро (рис. 20) — сильно переработанный* участок, сложенный уплощенными зернами плагиоклаза. „Луна-20".


1 µm

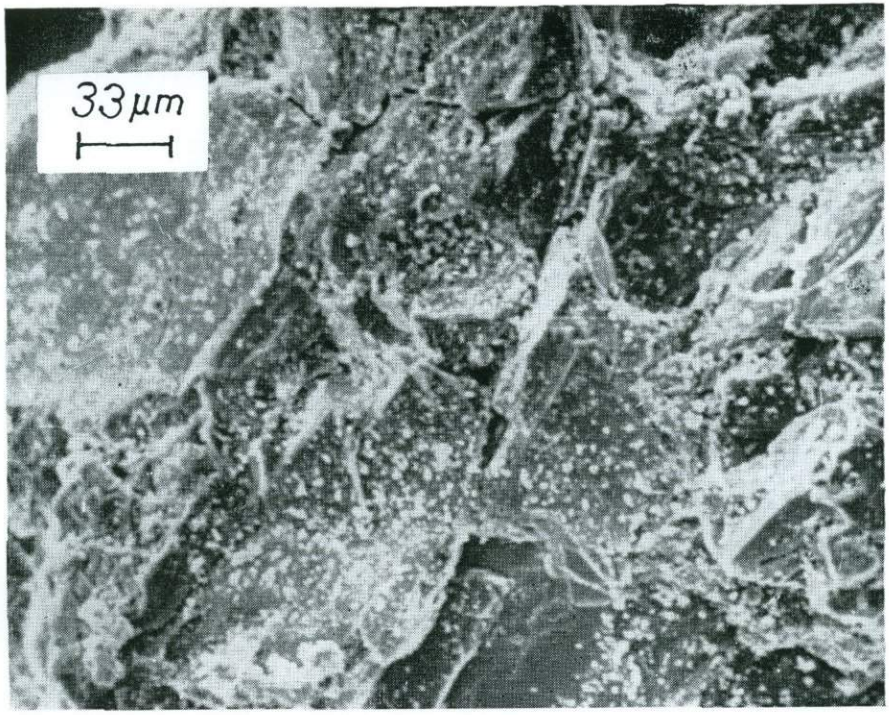

1 µm

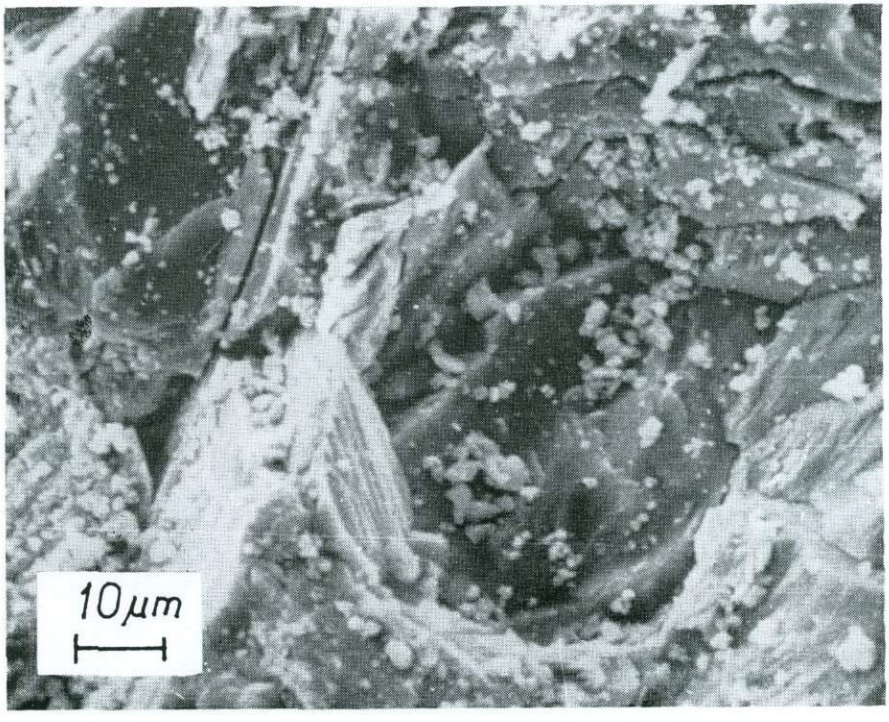
23. Surface of microgabbro fragment with features indicating a multiple impact history. Coarse-grained texture of the rock is well seen. Mineral grain boundaries are followed by cracks. Luna 20.

23. Поверхность фрагмента габбро, подвергшегося многократному ударному воздействию. Отчетливо заметна крупнозернистая структура породы. По границам минеральных зерен проходят трещины. „Луна-20".

24. Enlarged upper right-hand portion of Fig. 23 showing a strongly fractured surface, which reflects the sequence of impact events of variable energy. A low-velocity impact depression in the center is undoubtedly connected with the primary structure of the rock; its origin was preceded by the formation of cracks. Inductive striation is partly preserved on the depression walls and a high-velocity impact crater occurs on the bottom. Luna 20.

24. Увеличенное изображение правой верхней части рис. 23. Участок с заметной трещиноватостью, на поверхности которого отражена последовательность ударных событий с разной плотностью энергии. Образование представленной в центре рисунка низкоскоростной ударной депрессии произошло после формирования общей трещиноватости фрагмента породы и несомненно связано с первоначально заложенной системой. На дне депрессии — высокоскоростной ударный кратер, возникший уже после ее образования. Стенки депрессии частично сохранили индукционную штриховку. „Луна-20".


33μm


10μm

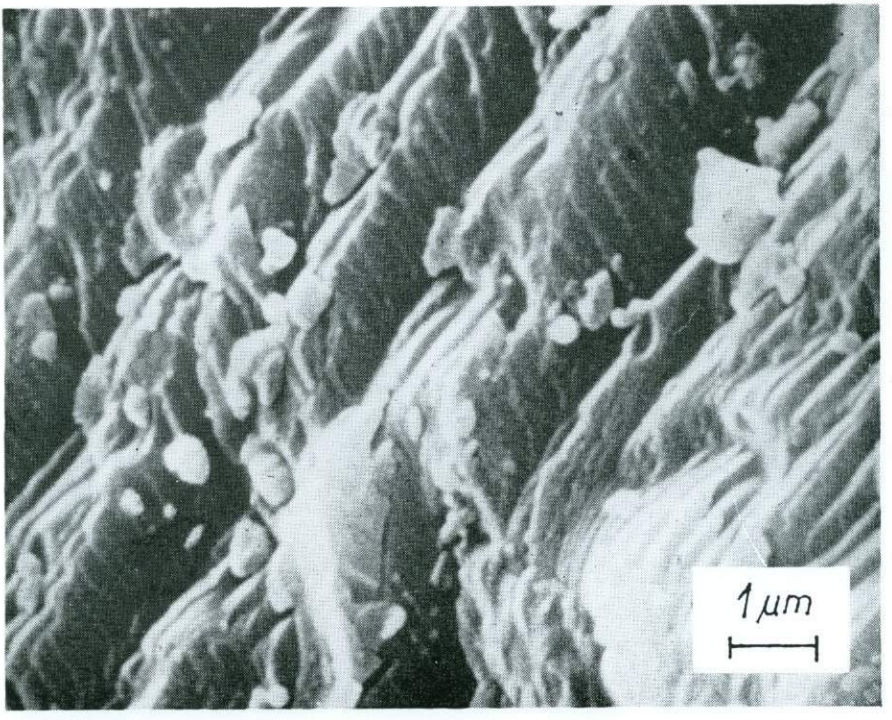
25. Detail of microgabbro surface. Pyroxene crystal which occupies the greater part of the figure is cut across by a crack. Grooves seen on the pyroxene surface probably reflect mineral cleavage. Luna 16.

25. Участок поверхности габбро. Основную часть снимка занимает разбитое трещиной зерно пироксена с ребристой поверхностью, вероятно, отражающей спайность. „Луна-16".

26. Enlarged central part of Fig. 25. The complex nature of the pyroxene grain relief is due to the cleavage plane systems of diverse perfection, manifested by systems of finer ribs superimposed on a coarsely stepped surface. Minor crater-like depressions are visible on the surface of some ribs. Luna 16.

26. Увеличенное изображение центральной части рис. 25. Сложный характер рельефа зерна пироксена определяется системами спайности разной степени совершенства и выражается в наложении на крупноступенчатый рельеф более тонкой ребристости. На поверхности отдельных ребер видны мелкие кратероподобные депрессии. „Луна-16".

10 μm

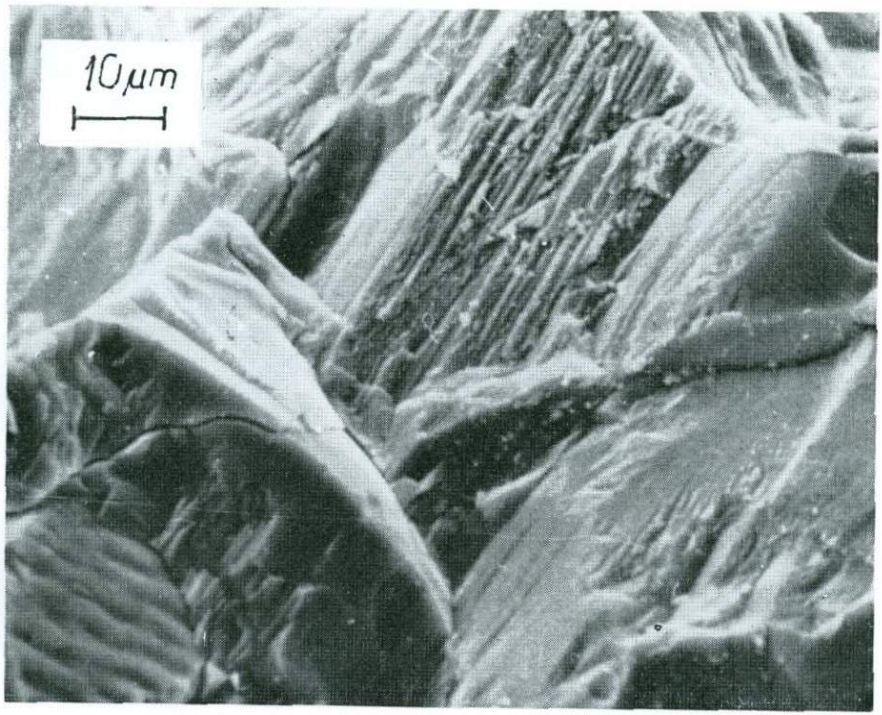

1 μm

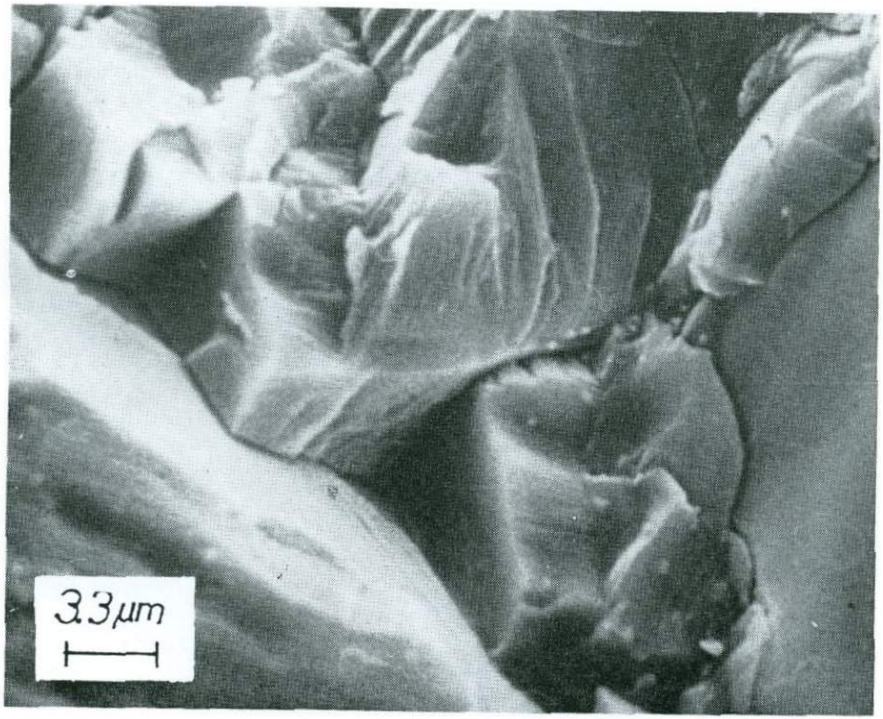
27. Part of gabbro surface, which is characterized by the chip surfaces along the interfaces of mineral grains. Mineral faces bear traces of inductive striation. Luna 16.

27. Участок поверхности габбро. Поверхность определяется в основном сколами по границам минеральных зерен и индукционной штриховкой на поверхности последних. „Луна-16".

28. Enlarged lower left portion of Fig. 27. Note fresh character of the surface. Luna 16.

28. Увеличенное изображение нижней левой части рис. 27. Следует отметить свежий характер поверхности. „Луна-16".


10 μm

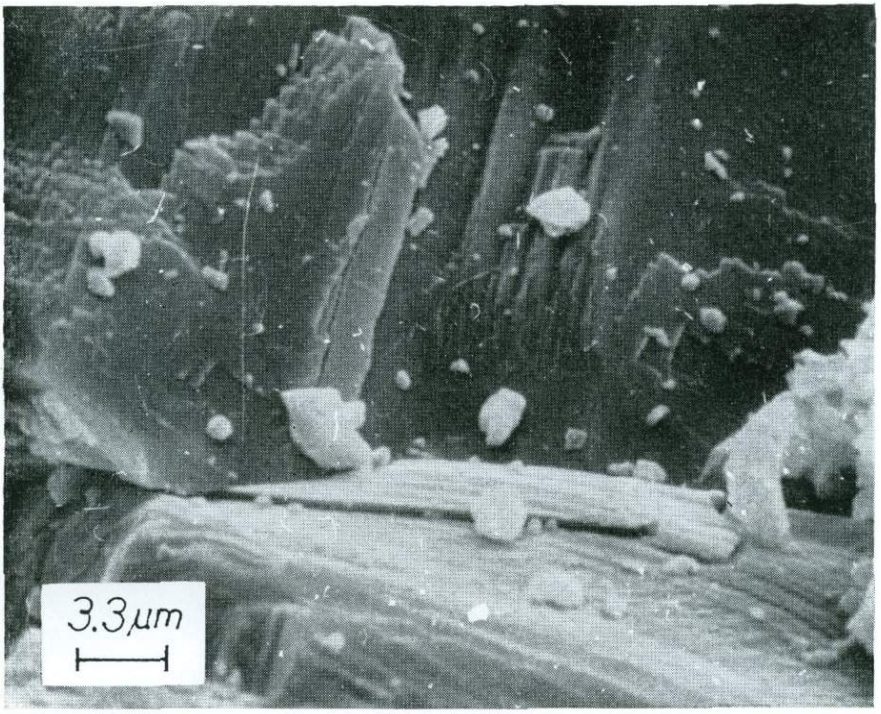

3.3 μm

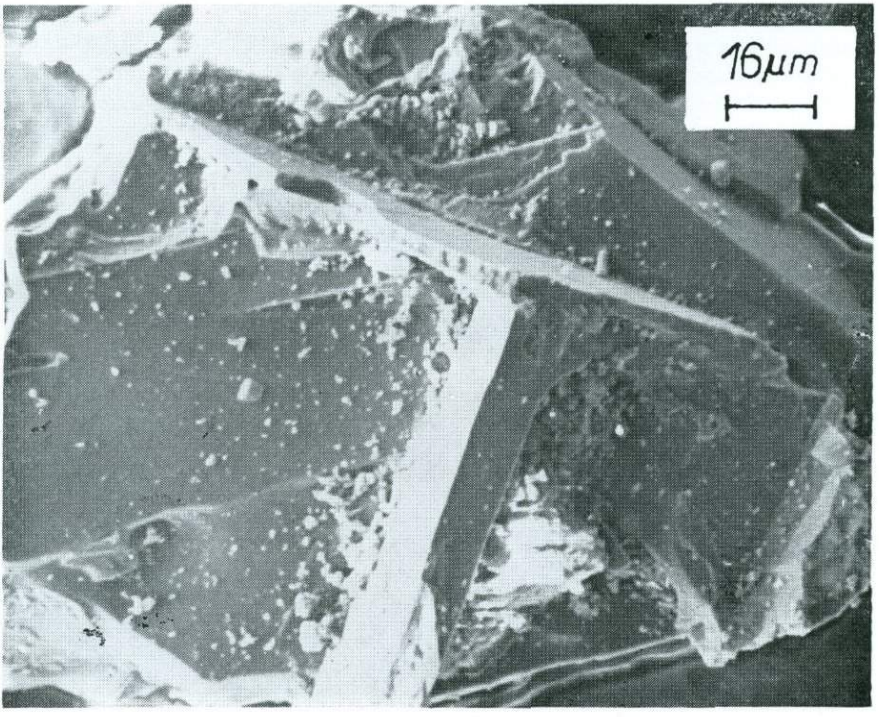
29. Close-up of microgabbro surface showing induction relief on mineral faces. It is well seen that the chip surfaces follow the boundaries of minerals. In the upper left portion a fracture revealed traces of mineral cleavage. Luna 16.

29. Участок поверхности габбро. Сколы по границам зерен с индукционным рельефом осложнены изломом по спайности в левой верхней части снимка. „Луна-16".

30. Microgabbro fragment formed dominantly of plagioclase and two perpendicular ilmenite laths. The relief of plagioclase grain is determined by both crystal faces (in the upper and lower parts of the photo) and impact-produced conchoidal fractures (on top left). Luna 16.

30. Фрагмент габбро, сложенный в основном плагиоклазом и двумя взаимно перпендикулярными идиоморфными пластинками ильменита. Рельеф зерен плагиоклаза определяется как кристаллографическими гранями минерала (наверху и внизу снимка), так и раковистыми изломани (слева наверху), образованными ударами. „Луна-16".


3.3μm


16μm

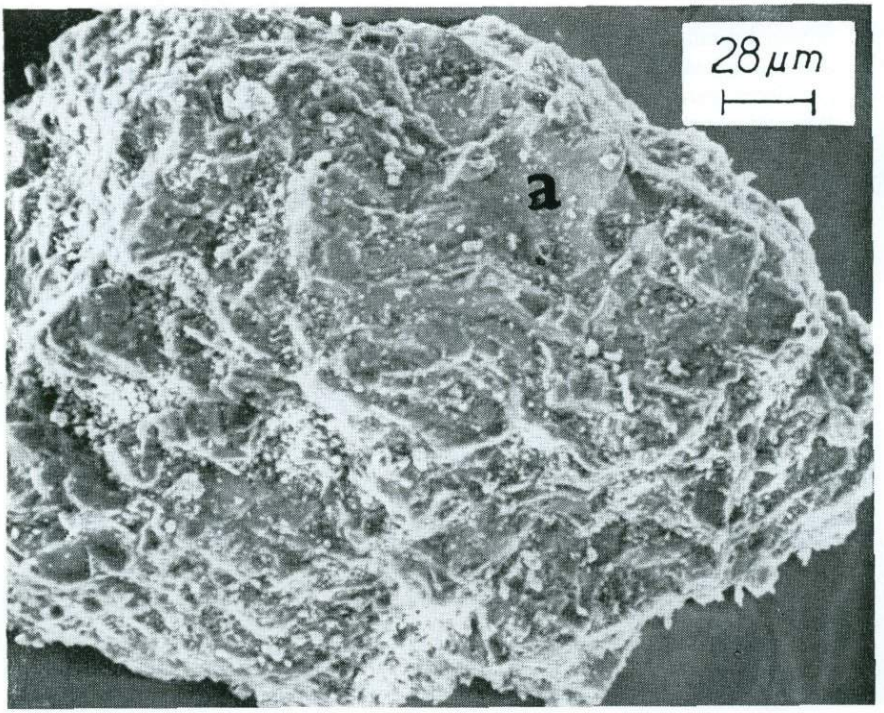
Anorthositic rocks
Породы анортозитового типа

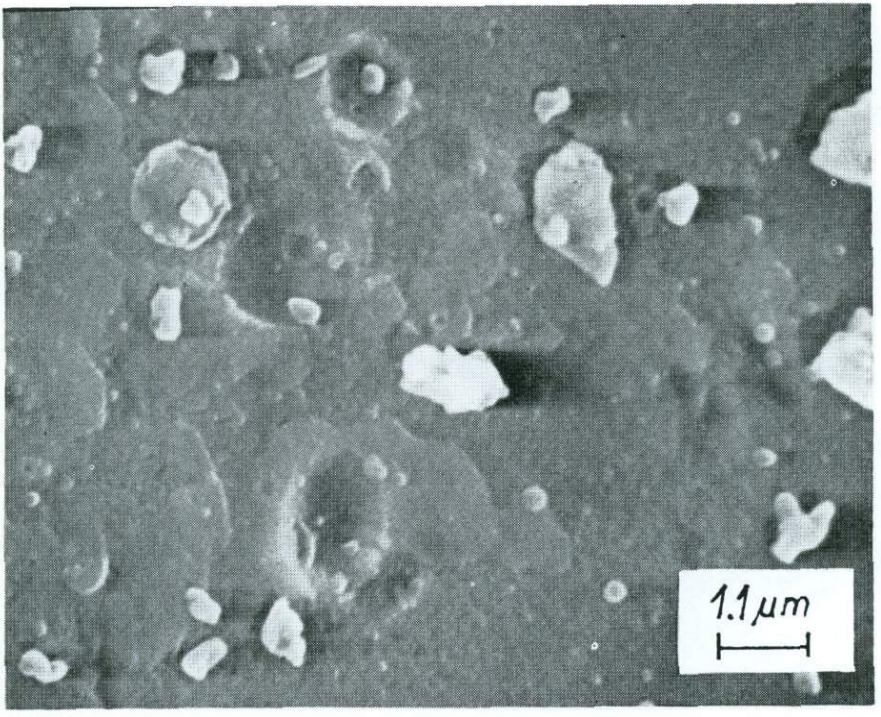
31. Fragment of ANT rock (anorthosite-norite-troctolite) with irregular shape, coarse-grained texture and strongly eroded surface. The fragment relief is uneven, with sharp protrusions, and complicated by numerous low-velocity impact depressions and pits. Very fine regolith particles are attached on the surface, especially in the depressions. A metallic inclusion is seen on the upper right ('a'). Luna 20.

31. Фрагмент породы анортозит-норит-троктолитового состава (АНТ) неправильной формы с грубозернистой структурой и с существенно эродированной поверхностью. Рельеф поверхности частицы неровный, с острыми выступами, осложнен большим количеством низкоскоростных ударных депрессий и выбоин. На поверхности фрагмента видны мелкие прилипшие частицы реголита, особенно сконцентрированные в понижениях рельефа. В правой верхней части — включение металла (обозначено „а"). „Луна-20".

32. Enlarged detail of Fig. 31 showing part of metallic inclusion surface. The relatively even surface is pitted with round dimples framed by raised rims. The dimples and their framing may be traces of the plastic state of metal surface, which allowed changes in the morphology of the relief forms (craters in this case) to occur. Light-colored irregular particles are attached plagioclase fragments. Luna 20.

32. Увеличенное изображение участка поверхности металлического включения (рис. 31). На относительно ровной поверхности заметны округлые лунки с примыкающими к ним рельефными обрамлениями. Возможно, лунки и обрамления являются следами пластичного состояния поверхности металла, при котором формы рельефа (в данном случае, кратеры) изменяют свою морфологию. Светлые частицы неправильной формы — прилипшие обломки плагиоклаза. „Луна-20".


28 μm
a

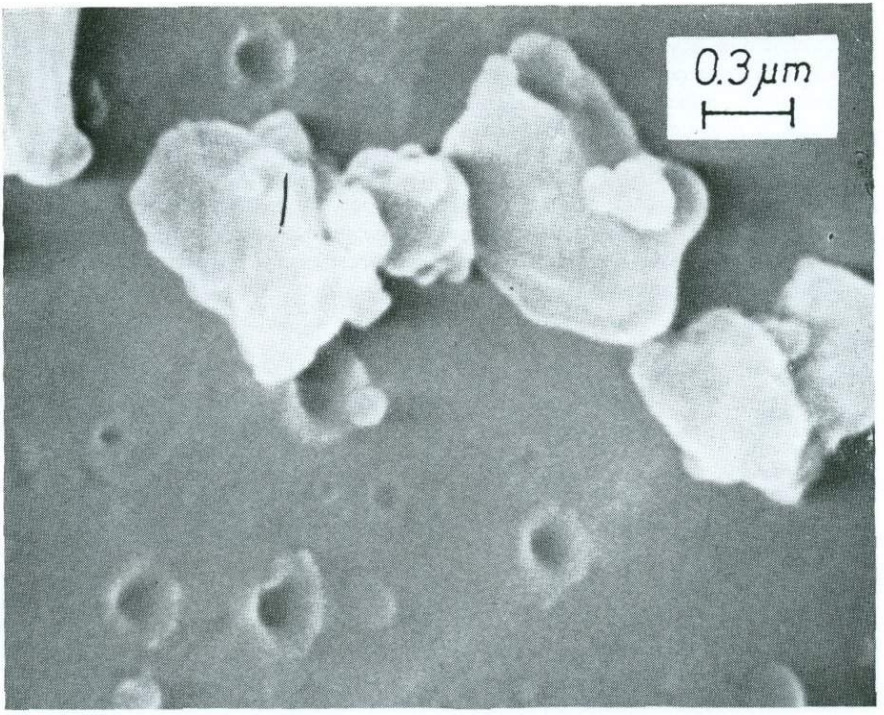

1.1 μm

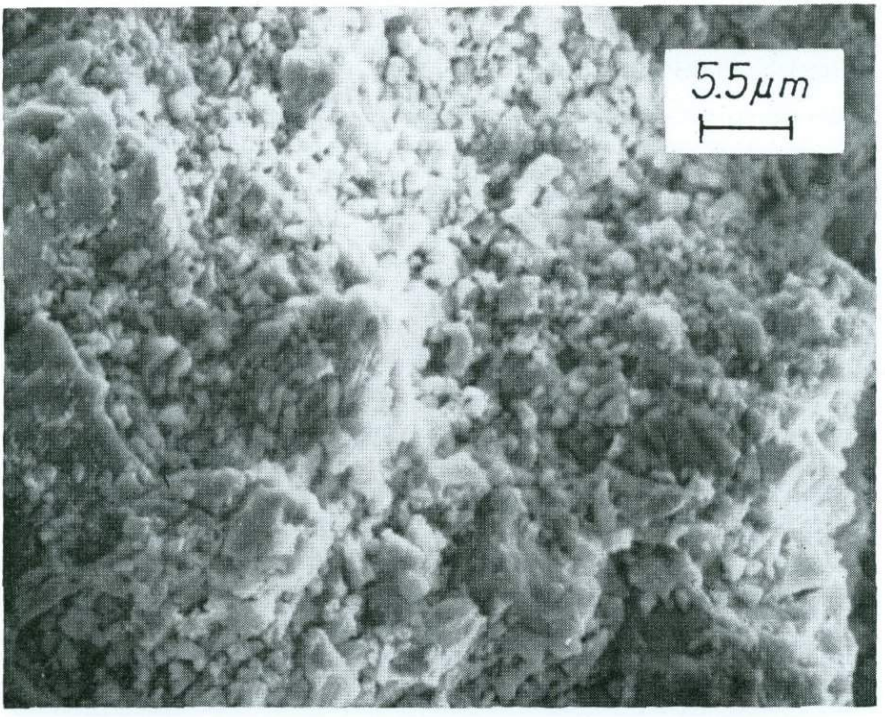
33. Enlarged detail of another part of the metallic inclusion in Fig. 31. Surface relief is characterized by deep microcraters (maximum about 0.5 μm in diameter) with prominent, partly melted rim, rounded mounds and spherules of metallic iron. White flat particles are attached plagioclase grains. Luna 20.

33. Увеличенное изображение другого участка металлического включения (рис. 31). Рельеф поверхности участка определяется глубокими микрократерами размером менее 0,5 мкм с хорошо выраженным оплавленным валом, а также прилипшими частицами плагиоклаза уплощенной формы. На поверхности участка заметны сферулы металлического железа. „Луна-20".

34. Fragment of ANT rock showing an impact depression filled with fine, partly welded regolith grains. Melted rock portions are well seen in the lower right-hand corner and on the left. Luna 20.

34. Фрагмент породы состава АНТ с ударной деформацией, заполненной мелкими, частично спекшимися зернами реголита. Внизу справа и слева хорошо видны оплавленные участки породы. „Луна-20".


0.3μm

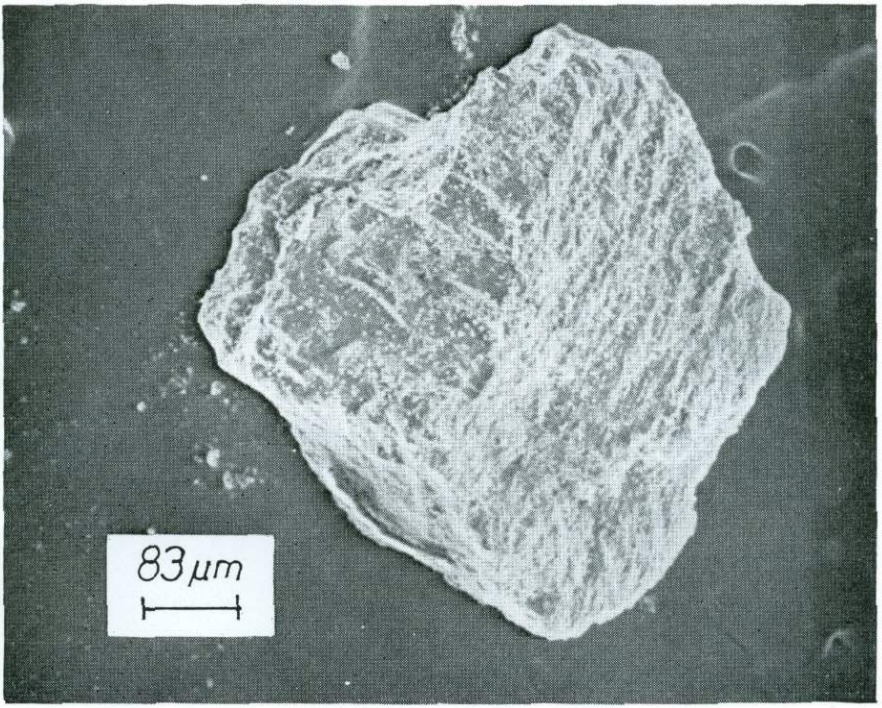

5.5μm

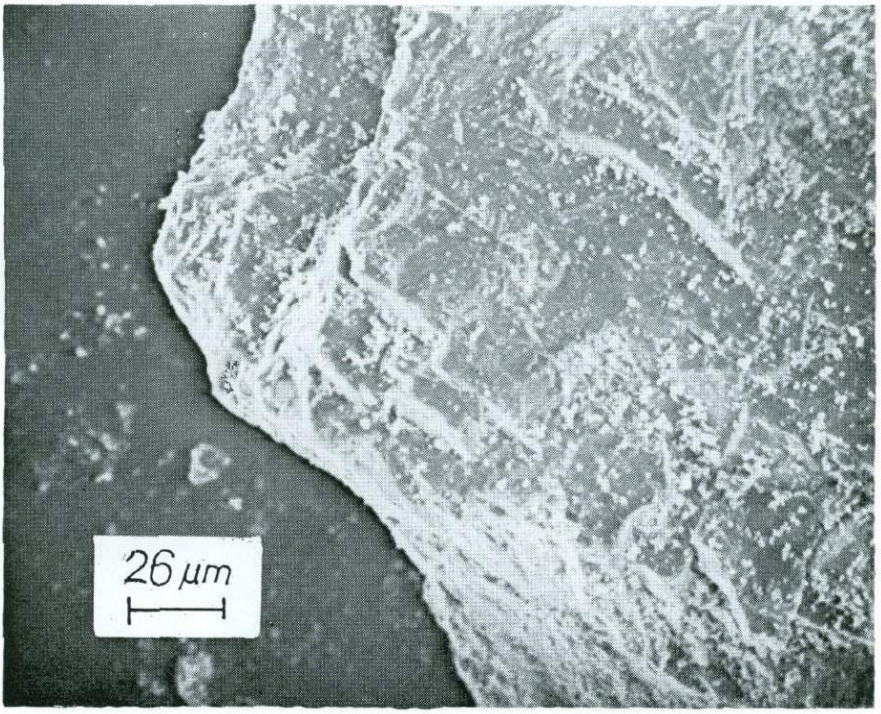
35. Fragment of ANT rock of irregular angular form, slightly modified by exogenic agents. Unevenness of the surface gives it a wavy character on the right and a step-like on the left. Impact deformations (craters and pits) are seen on the fragment periphery. Luna 20.

35. Фрагмент породы АНТ состава неправильной, угловатой формы, слабо измененный под действием экзогенных факторов. На поверхности фрагмента рельефно выделяются сколы — неровные с волнистым характером в правой части и ступенчатые в левой. По периферии фрагмента — хорошо выраженные ударные деформации (кратеры, выбоины). „Луна-20".

36. Enlarged left portion of Fig. 35 showing an impact crater whose morphology reflects crystalline texture of the rock. The fragment surface is strewn with fine regolith particles welded to the host. Luna 20.

36. Увеличенное изображение левой части рис. 35 — ударный кратер, в морфологии которого отражается кристаллическое строение породы. Поверхность участка усеяна мелкими припекшимися частицами реголита. „Луна-20".


83 μm

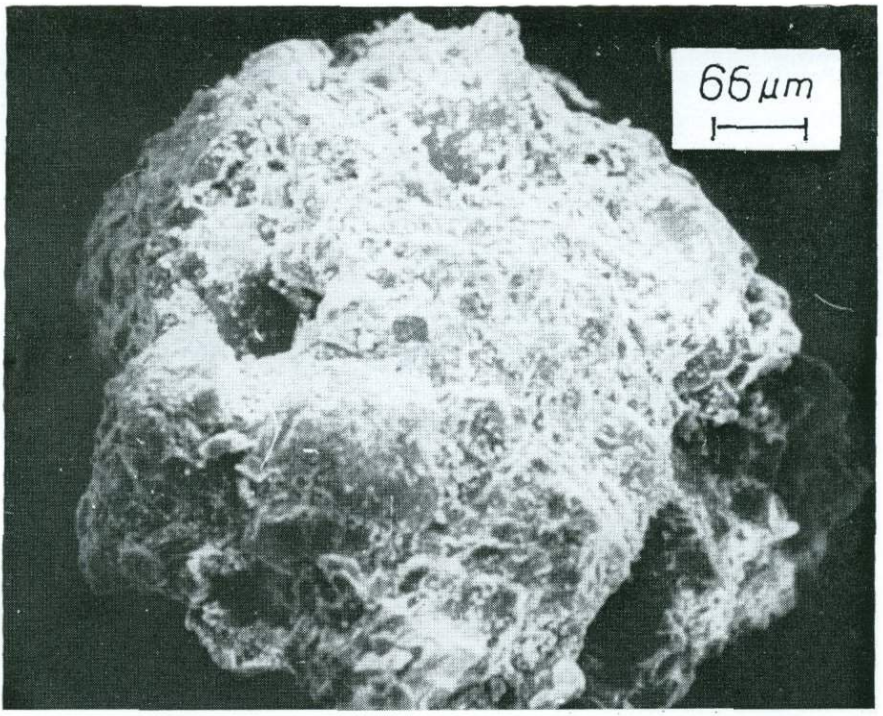

26 μm

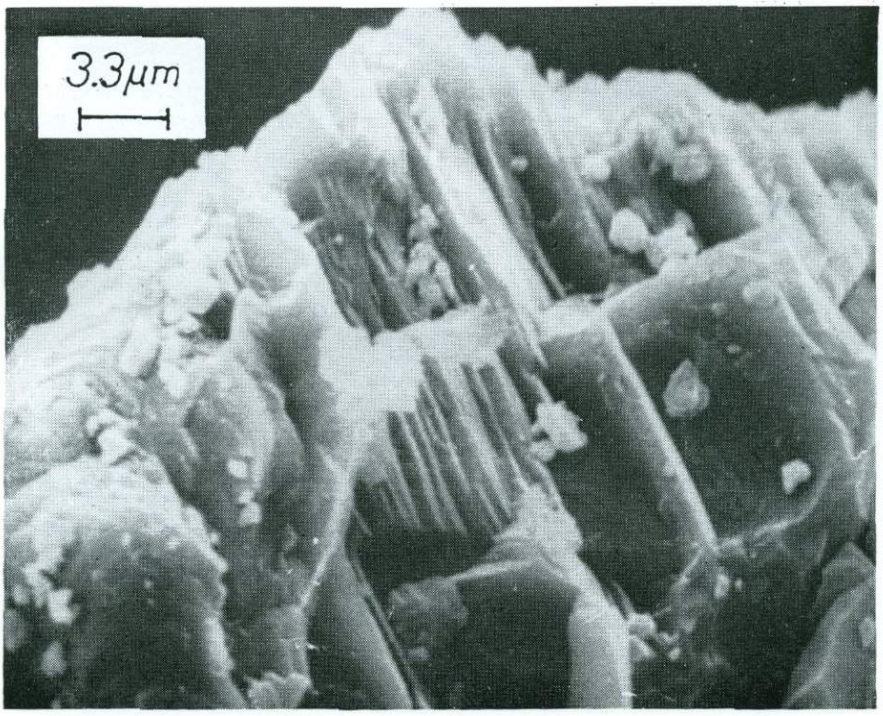
37. Fragment of ANT rock of irregular shape containing many metallic iron inclusions (dark sections on the lower right and left). The fragment surface is hummocky and strongly reworked, characterized by microcraters, small chip surfaces and pits. Luna 20.

37. Фрагмент породы АНТ состава неправильной формы с многочисленными включениями металлического железа (на рисунке темные участки внизу справа и в левой части). Поверхность фрагмента, имеющая в целом бугорчатый рельеф, заметно изменена. Общий характер поверхности фрагмента определяется. микрократерами, мелкими сколами и выбоинами. „Луна-20".

38. Enlarged upper part of Fig. 37, showing cellular structure of the fragment surface. A fine, step-like fracture (probably along the cleavage) is seen on the top. Slightly melted cells (on the right) of almost regular geometric shape, may have resulted from crumbling of minerals. This unusual surface structure suggests that it originated during recrystallization of primary anorthositic rocks. Luna 20.

38. Увеличенное изображение верхней части рис. 37, демонстрирующее ячеистую структуру поверхности фрагмента. Местами (сверху) рельеф поверхности определяется мелкоступенчатым изломом (вероятно, по спайности). В правой части снимка — слегка оплавленные ячейки почти правильной геометрической формы, возникщие, вероятно, в результате выкрашивания минералов. Необычность поверхностной структуры фрагмента позволяет предполагать, что она возникла в процессе перекристаллизации первичных анортозитовых пород. „Луна-20".


66 μm

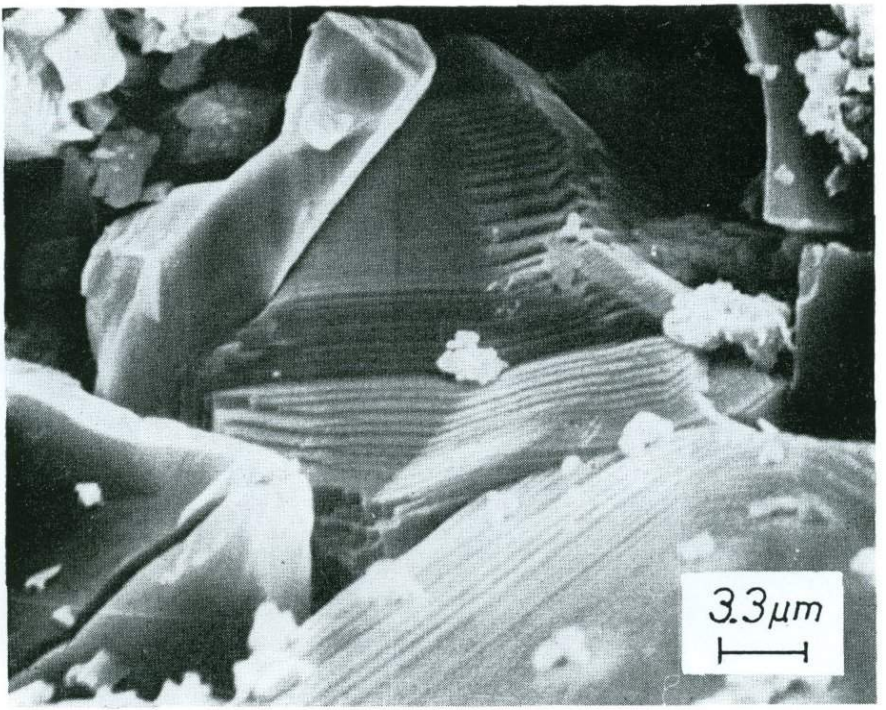

3.3μm

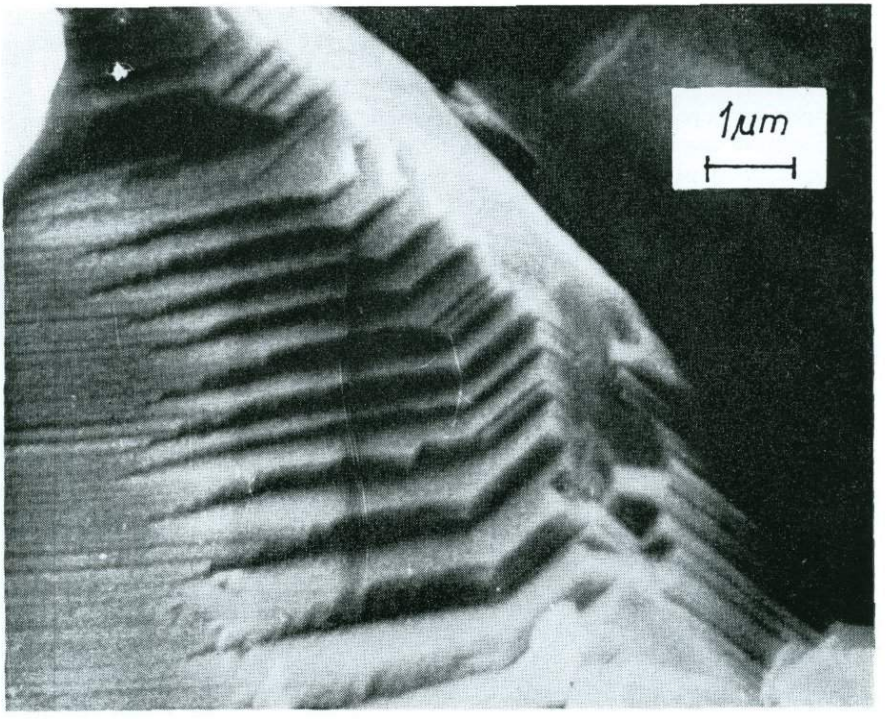
39. Enlarged detail of central part of Fig. 37 showing minerals filling the cavity. Prominent growth steps are seen on their surface. Luna 20.

39. Увеличенное изображение центрального участка рис. 37. Поверхность выстилающих пору минеральных индивидов отличается отчетливо выраженными ступеньками роста. „Луна-20".

40. Enlarged detail of growth "pyramide" shown in Fig. 39. Fine striation on the left is probably additional and of inductive character. Luna 20.

40. Увеличенное изображение пирамиды роста, изображенной на рис. 39. Тонкая штриховка слева является, вероятно, наложенной и имеет индукционную природу. „Луна-20".


3.3μm

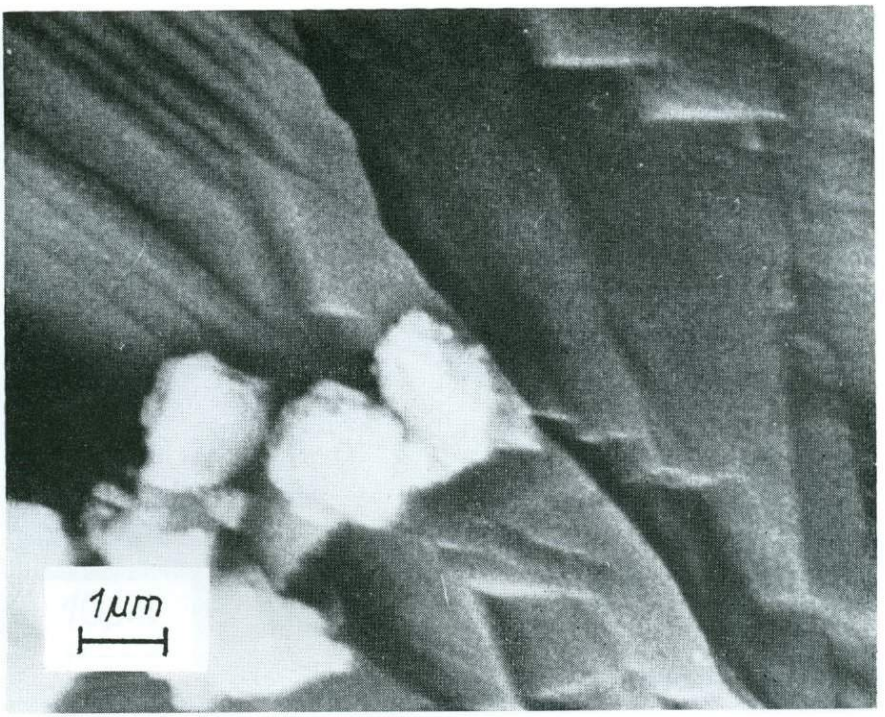

1μm

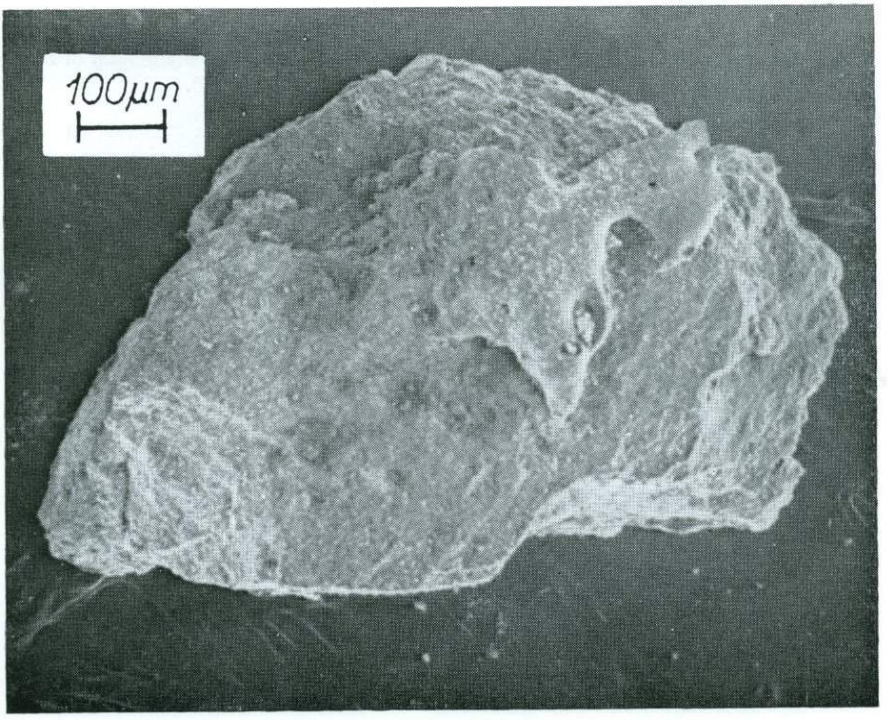
41. Enlarged detail of ANT rock surface shown in Fig. 37. The surface structure is controlled by growth elements of the mineral and by inductive forms (upper left corner). Luna 20.

41. Увеличенное изображение участка поверхности фрагмента АНТ состава, демонстрируемого на рис. 37. Скульптура поверхности участка представлена элементами роста минерального индивида и индукционными формами (наверху слева). „Луна-20".

42. Fragment of ANT rock, irregular angular in shape. Microcraters (bottom part), chip surfaces (along the entire periphery) and splash of silicate material (upper left and central parts) suggest a long exposure of the fragment. Luna 20.

42. Фрагмент породы АНТ состава неправильной, угловатой формы. Микрократеры (в нижней части рисунка), сколы (по всему контуру фрагмента), набрызги силикатного расплава (верхняя левая и центральная части рисунка) указывают на длительную экспозиционную историю частицы. „Луна-20".


1μm

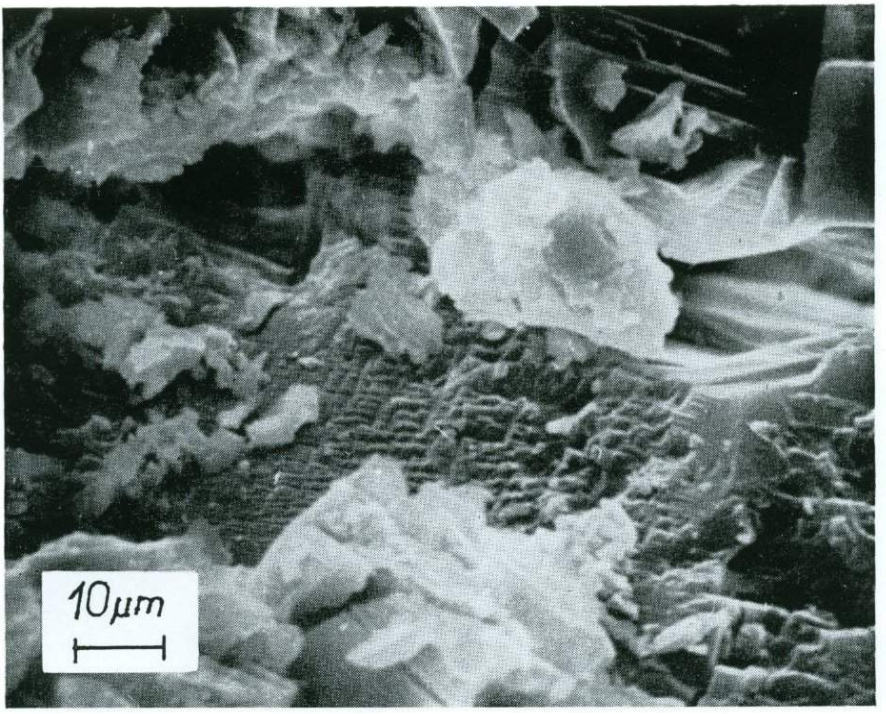

100μm

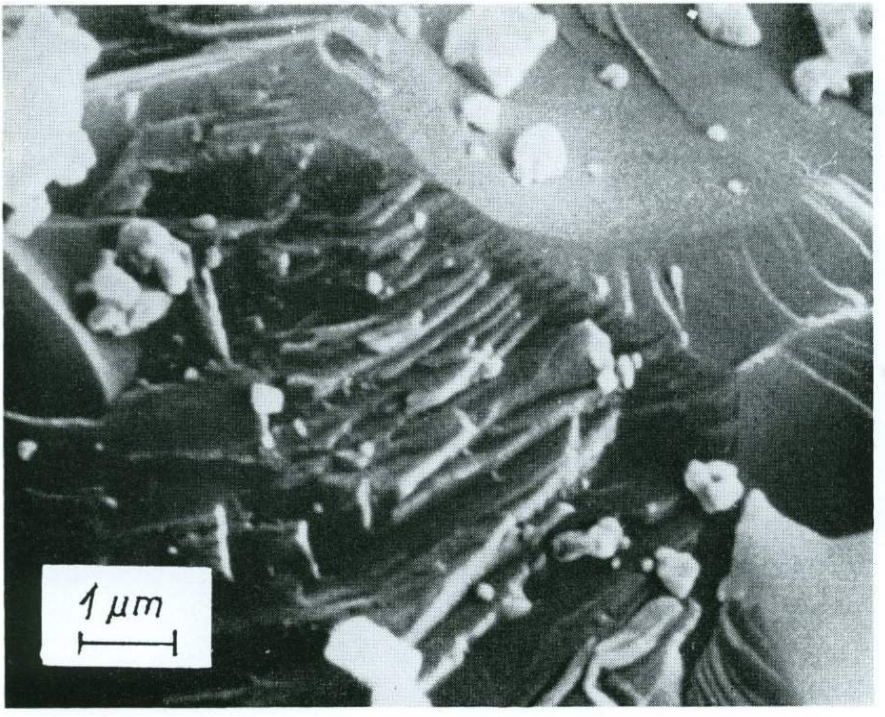
43. Pyroxene inclusion in ANT rock. Step-like ribbed structure of the surface mirrors the characteristic cleavage of pyroxenes. Luna 20.

43. Включение зерна пироксена с ребристым, ступенчатым характером поверхности, отражающим свойственную пироксенам спайность, в породу АНТ состава. „Луна-20".

44. Impact deformation on ANT fragment surface. Conchoidal fracture in the central part of deformation (on the right) passes towards the margin into a system of nearly radial cracks, which presumably follow cleavage planes. Luna 20.

44. Ударная деформация на поверхности фрагмента АНТ состава. Раковистый излом в центральной части деформации (правая часть рисунка) сменяется на ее периферии системой близких к радиальным трещин, развитых, вероятно, по спайности. „Луна-20".


10μm


1 μm

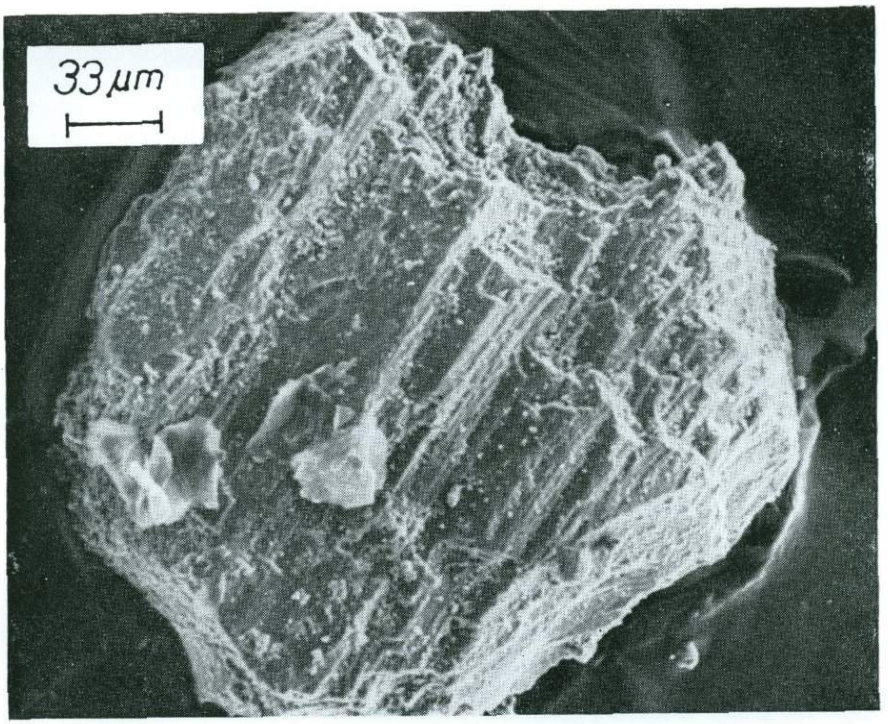
Plagioclases
Плагиоклазы

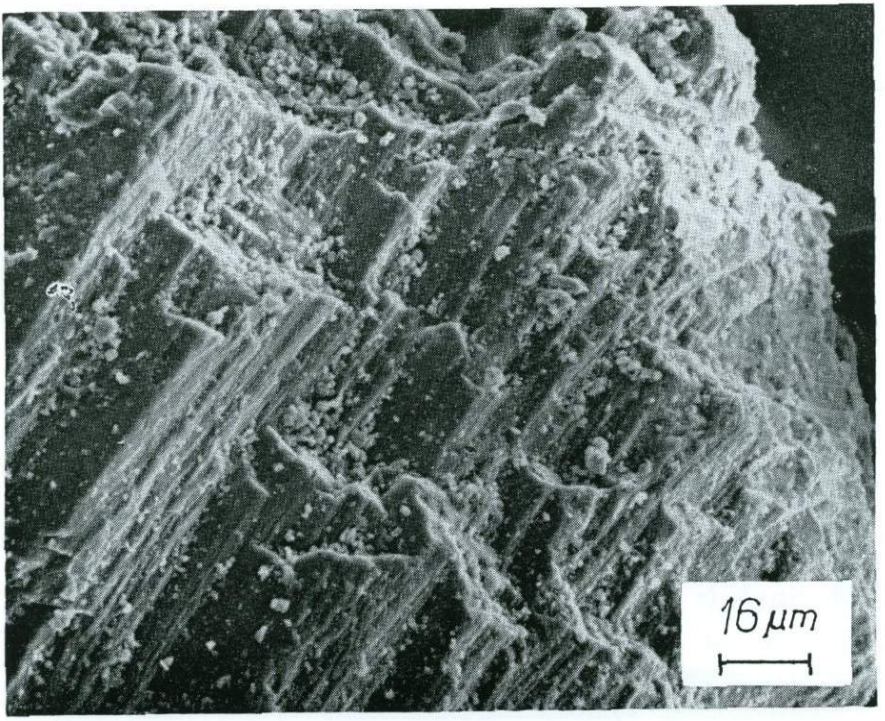
45. Plagioclase grain of irregular shape. Composite surface relief diversified by numerous fractures and typical chip surfaces developed along cleavage planes. Fine regolith dust is attached to grain surface. Luna 20.

45. Зерно плагиоклаза неправильной формы со сложным рельефом поверхности, с большим количеством изломов и характерных сколов по спайности. Поверхность зерна осложнена прилипшими к ней мелкими частицами грунта. „Луна-20".

46. Enlarged detail of upper right-hand part of Fig. 45 showing marked chip surfaces along cleavage planes. Cleavage plane surfaces are relatively even. Low-velocity impact deformation is seen at the top; its morphology is controlled by the plagioclase cleavage. Luna 20.

46. Увеличенное изображение верхней части рис. 45. Отчетливо заметны хорошо выраженные сколы по спайности. Поверхность плоскостей спайности относительно ровная. В верхней части фотографии видна ударная деформация низкоскоростного типа, морфология которой подчинена спайности плагиоклаза. „Луна-20".


33 μm

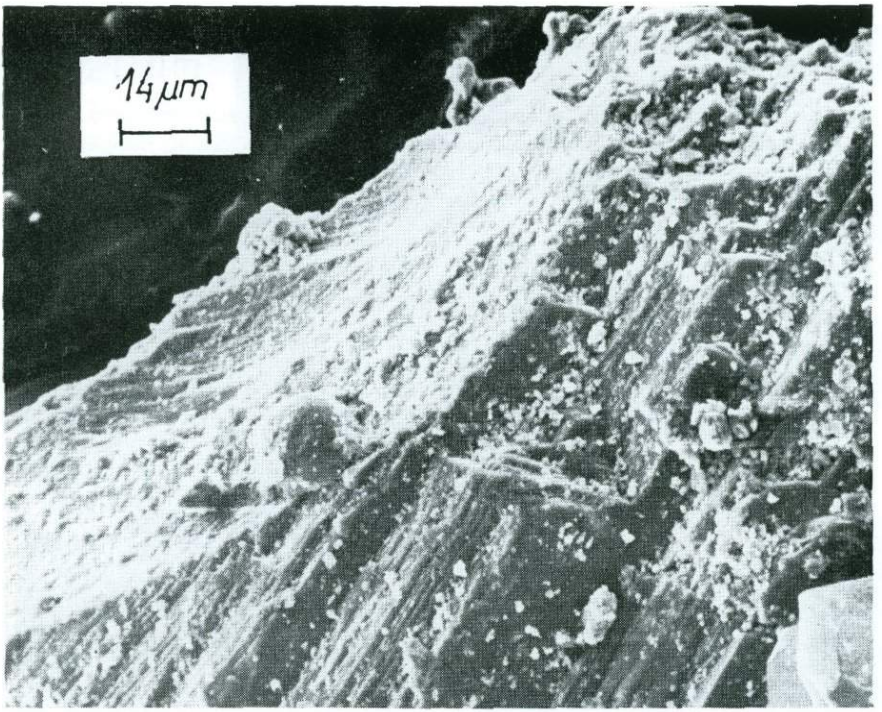

16 μm

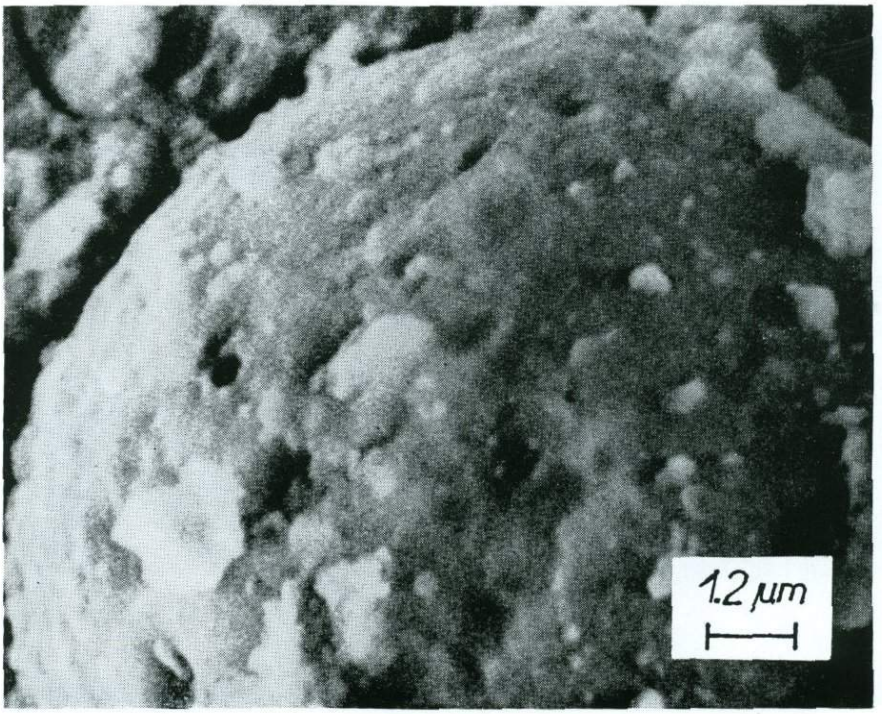
47. Enlarged lower right-hand portion of Fig. 45 (rotated by 180°). Significant conchoidal fracture (on the left) and character of the impact deformation are characteristic rather of glass than of plagioclases. Relief of this type is likely to be produced by high-energy impact event. A spherical particle is attached on the conchoidal fracture plane. In the upper right-hand corner there is a low-velocity impact crater with cleavage-controlled relief. Luna 20.

47. Увеличенное изображение правой нижней части рис. 45 (повернуто на 180°). Крупный раковистый излом (слева) и характер ударной деформации, не свойственные плагиоклазу и скорее характерные для стекол, могут свидетельствовать об образовании этого элемента рельефа в результате достаточно высокоэнергетического ударного воздействия. На поверхности раковистого излома отчетливо выделяется сферическая частица. Наверху справа — ударный кратер низкоскоростного типа, в общей морфологии которого отчетливо проявляется спайность плагиоклаза. „Луна-20".

48. Spherical particle of basaltic composition on the plagioclase grain (enlarged part of Fig. 47). Fine, hummocky surface of the particle may be evidence of the incomplete melting of silicate material. Negative deformations have been generated by partial outgassing of the material or by bombardment of the sphere surface, still capable of plastic deformation, with fine regolith grains. Luna 20.

48. Сферическая частица базальтового состава на поверхности зерна плагиоклаза (увеличенное изображение центральной части рис. 47). Бугристая поверхность частицы может свидетельствовать о неполном проплавлении ее вещества. Образование отрицательных форм рельефа может быть связано как с частичной дегазацией вещества, так и с ударами зерен реголита о еще пластичную поверхности частицы. „Луна-20".


14 µm

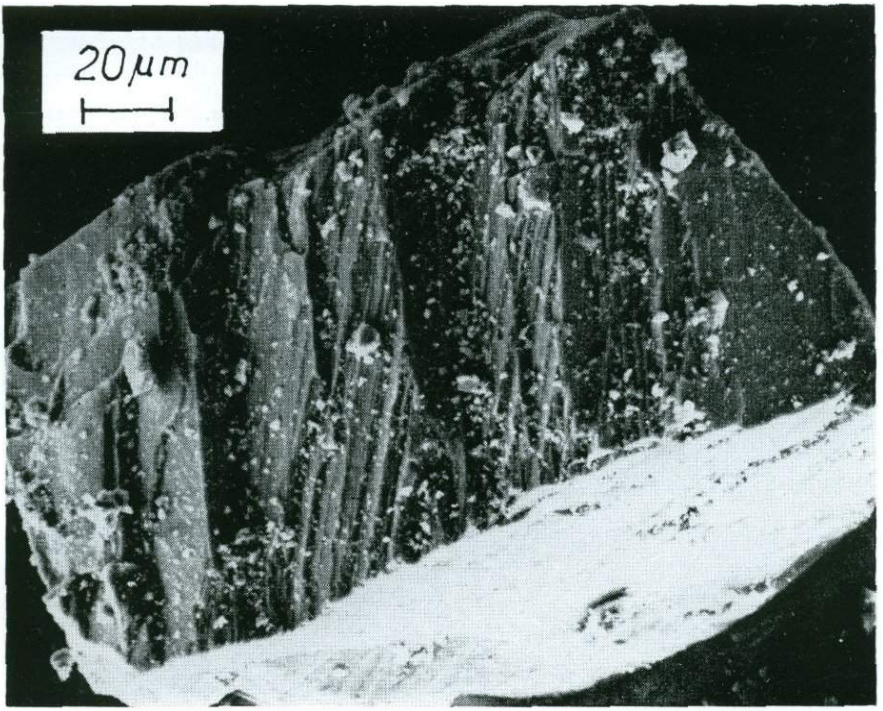

1.2 µm

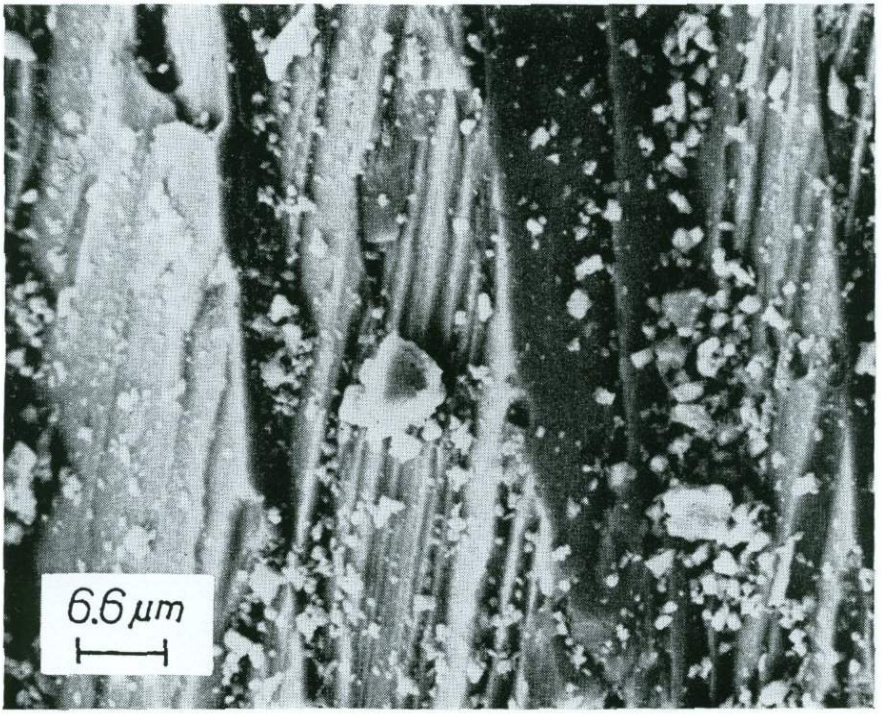
49. Plagioclase fragment of fresh appearance. Two intersecting systems of linear structures are well seen on its surface. Luna 20.

49. *Обломок зерна плагиоклаза, имеющий свежий облик и резкие очертания.* Рельефно выделяются две пересекающиеся системы линейных структурных элементов поверхности. „Луна-20".

50. *Enlarged central part of Fig. 49. Fine linear structure on the grain surface may* reflect either plagioclase twinning or cleavage. Coarser lineation was probably produced by shock effect. Luna 20.

50. Увеличенное изображение центральной части рис. 49. Тонкая штриховка на поверхности зерна может быть связана либо с собственным двойникованием плагиоклаза, либо с его спайностью; более грубые линейные элементы обусловлены, вероятно, шоковыми деформациями зерна. „Луна-20".


20 μm

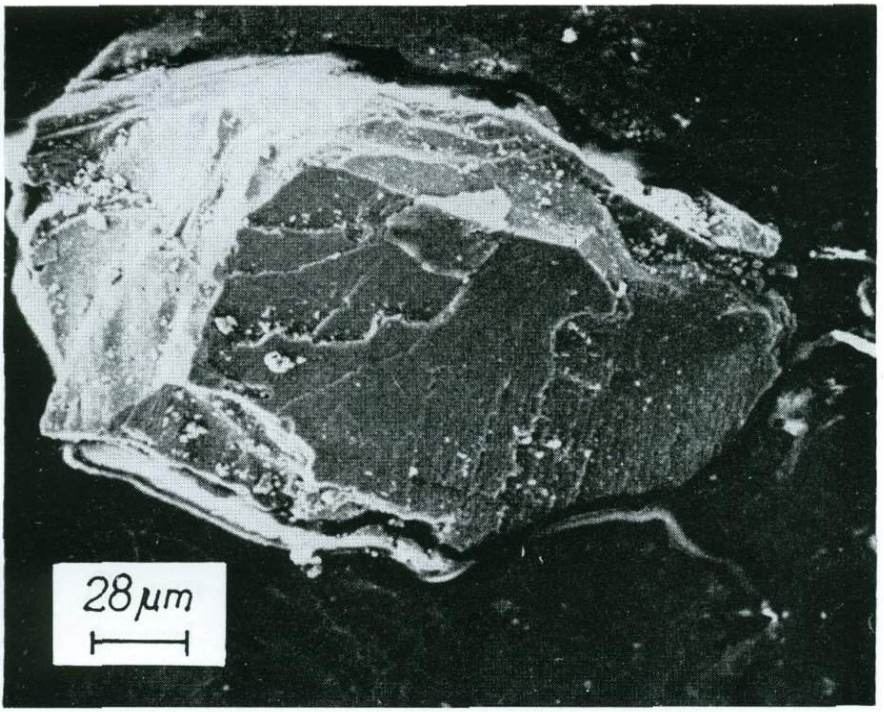

6.6 μm

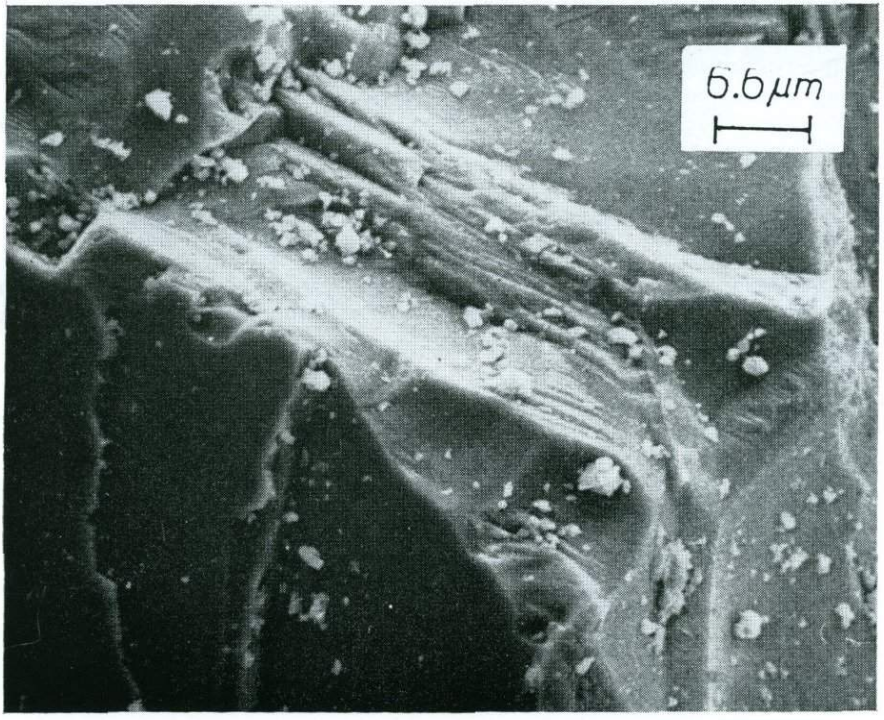
51. Plagioclase fragment showing evidence of impact events. Left part is markedly deformed, whilst crystal forms of plagioclase are preserved on the right. Luna 20.

51. Обломок плагиоклаза, подвергшийся ударному воздействию. В верхней правой части видны сохранившиеся элементы кристаллографической огранки минерала. Левая часть заметно деформирована. „Луна-20".

52. Enlarged upper left part of Fig. 51 (rotated 90° in clockwise direction). Deformed part of the surface is characterized by conchoidal fracture, and impact features: pits, dimples and occasional linear structures. Flat steps on bottom left are possibly connected genetically with cleavage planes. Luna 20.

52. Увеличенное изображение верхней левой части рис. 51 (повернуто на 90° по часовой стрелке). Для демонстрируемого участка поверхности зерна с раковистым изломом весьма характерны элементы рельефа, имеющие ударный генезис: выколки, лунки, линейные структуры локального простирания. Слева внизу резко выделяются плоские уступы, которые, вероятно, приурочены к плоскостям спайности. „Луна-20".


28μm

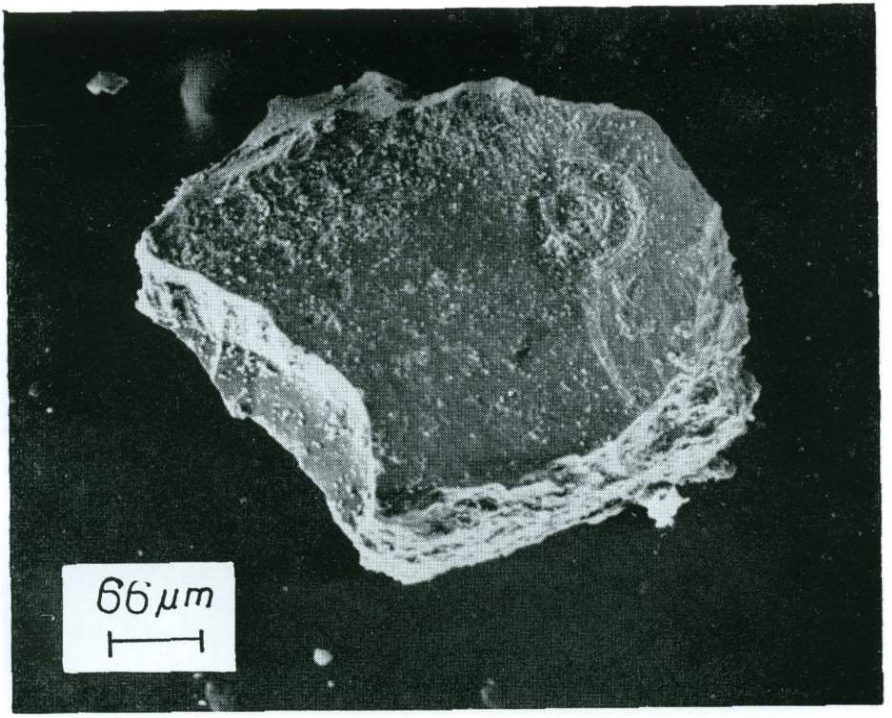

6.6μm

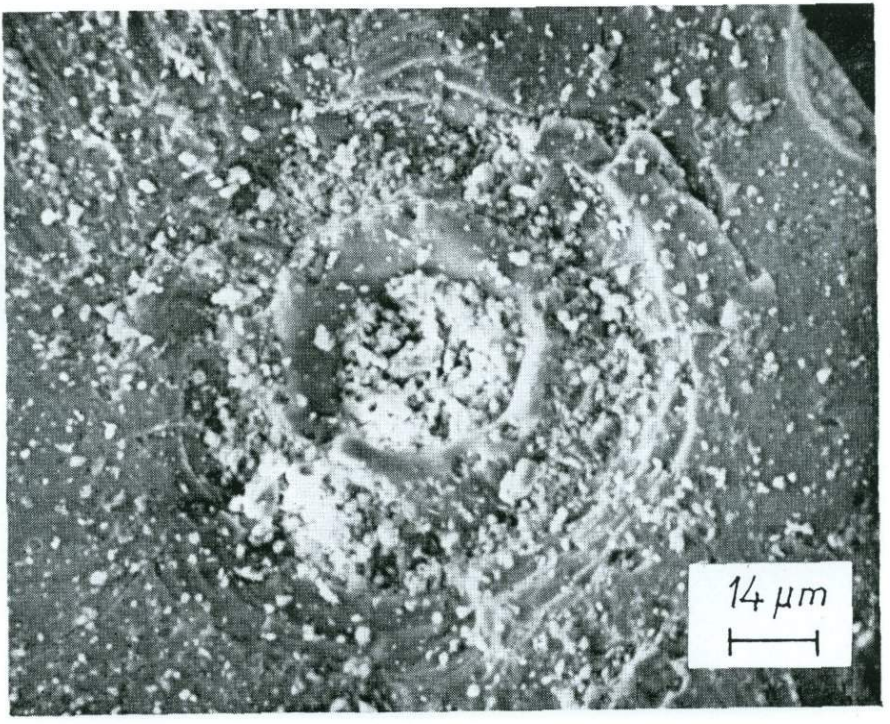
53. Plagioclase fragment with impact crater on even surface which corresponds to a cleavage plane. Luna 16.

53. Обломок зерна плагиоклаза с ударным кратером на ровной поверхности, отвечающей плоскости спайности. „Луна-16".

54. Enlarged detail of Fig. 53 showing impact crater on the plagioclase surface. The crater is prominent and all its morphological elements are well developed: pit (partly filled with regolith dust), rim and spall zone. All of them show traces of melting. The spall zone is surrounded by discontinuous 'pseudorim' adjoined (mainly at the top) by fracture zone. The fractures do not show preferred orientation and are not related with the internal structure of plagioclase. The pronounced morphology of the crater and plastic character of its elements suggest that the impacting projectile fell perpendicularly (or nearly so) to the cleavage plane of the mineral. Luna 20.

54. Увеличенное изображение ударного кратера (рис. 53) на поверхности плагиоклаза. Кратер отчетливо выражен и характеризуется развитостью всех морфологических элементов; центральная воронка (частично заполненная мелкими зернами реголита) и вал кратера оплавлены. Хорошо выделяется зона откола, также со следами оплавления, ограниченная „псевдовалом", не везде четко прослеживающимся. К „псевдовалу" примыкает (в основном, в верхней части рисунка) зона трещиноватости. Трещины не имеют преимущественного направления и не связаны с внутренней структурой плагиоклаза. Четкая морфология кратера и рельефность его элементов обусловлены тем, что направление удара „снаряда" было перпендикулярным (или почти перпендикулярным) к поверхности плоскости спайности минерала. „Луна-16".


66 µm

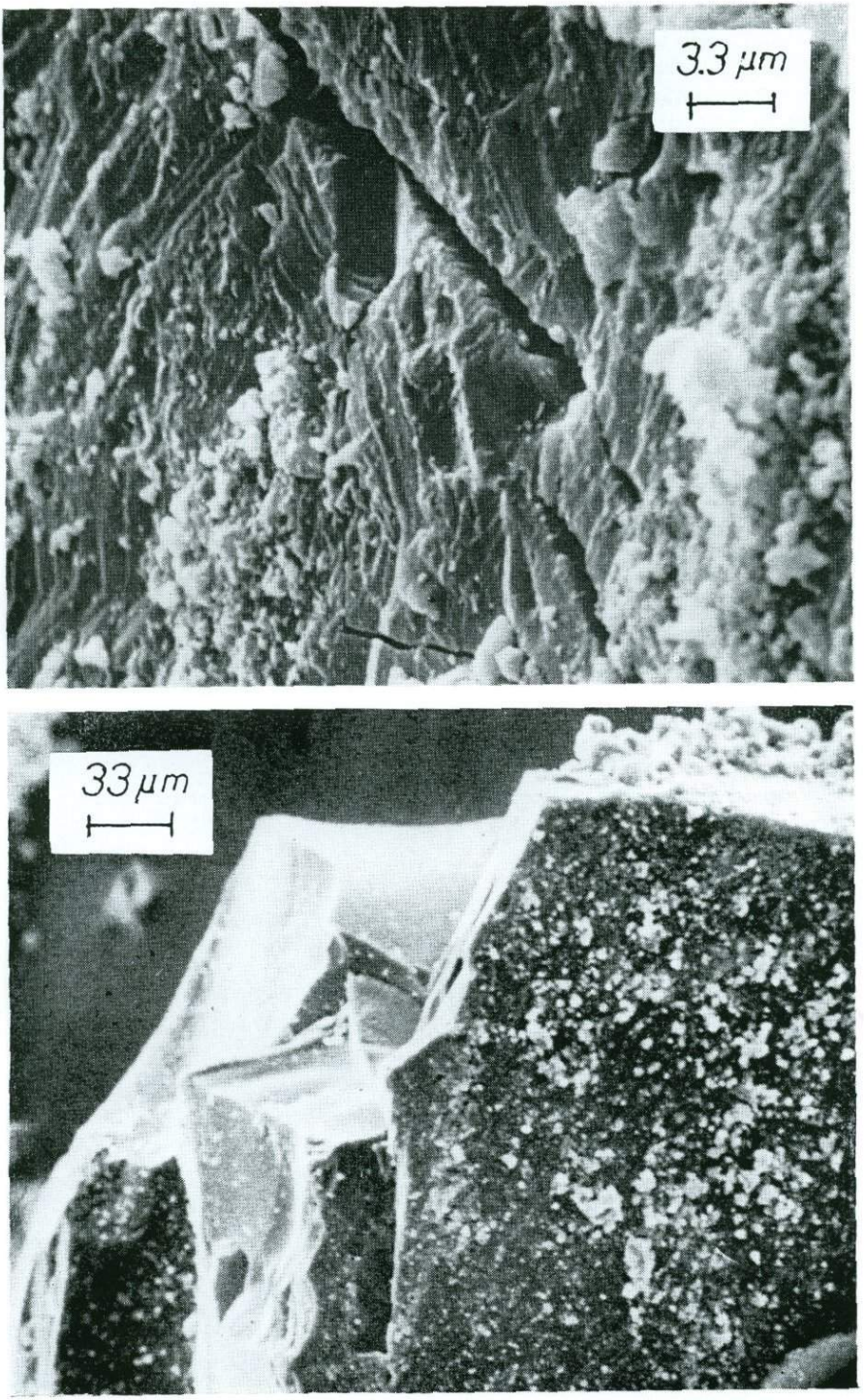

14 µm

55. Part of plagioclase grain with finely undulate unsmoothed surface complicated by abundant regolith dust particles attached to the host. The grain surface is cut by fractures which may have been produced by impact event and are not associated genetically with the internal structure of the mineral. Luna 20.

55. Участок поверхности зерна плагиоклаза с шероховатым мелковолнистым рельефом, осложненным многочисленными прилипшими мелкими частицами грунта. Поверхность зерна разбита трещинами, имеющими, вероятно, ударное происхождение и не связанными генетически с внутренней структурой минерала. „Луна-20".

56. Part of plagioclase grain showing both even surfaces corresponding to cleavage planes and conchoidal fracture surfaces. Agglomerate of partly melted particles welded to the grain surface is seen in the upper right-hand corner. Luna 16.

56. Участок зерна плагиоклаза, характеризующийся присутствием как сколов по спайности, так и сколов с раковистым изломом. Наверху справа — агломерат оплавленных частиц, припекшихся к поверхности зерна. „Луна-16".

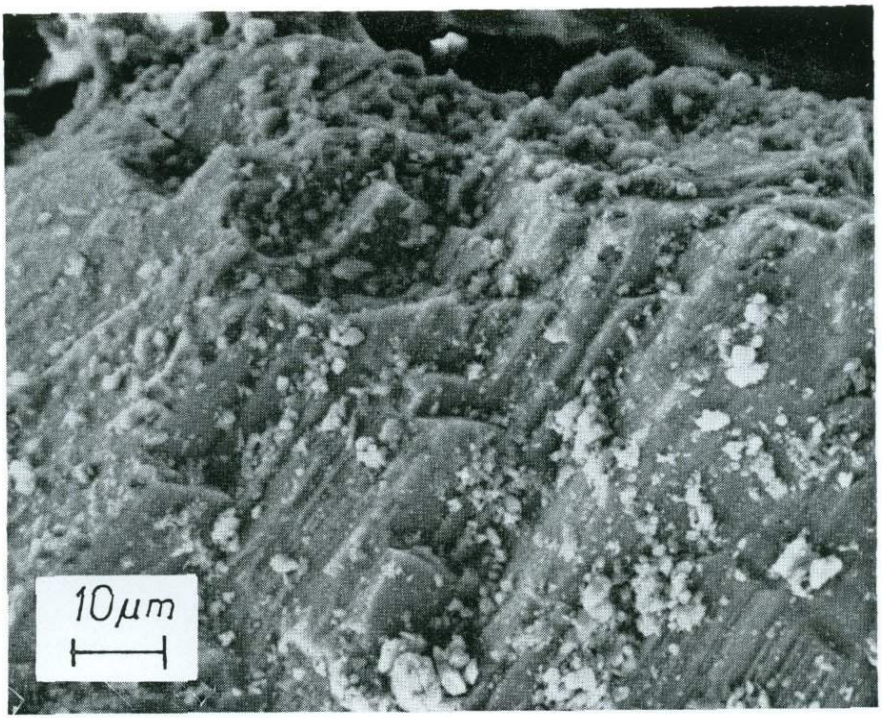

3.3 μm
33 μm

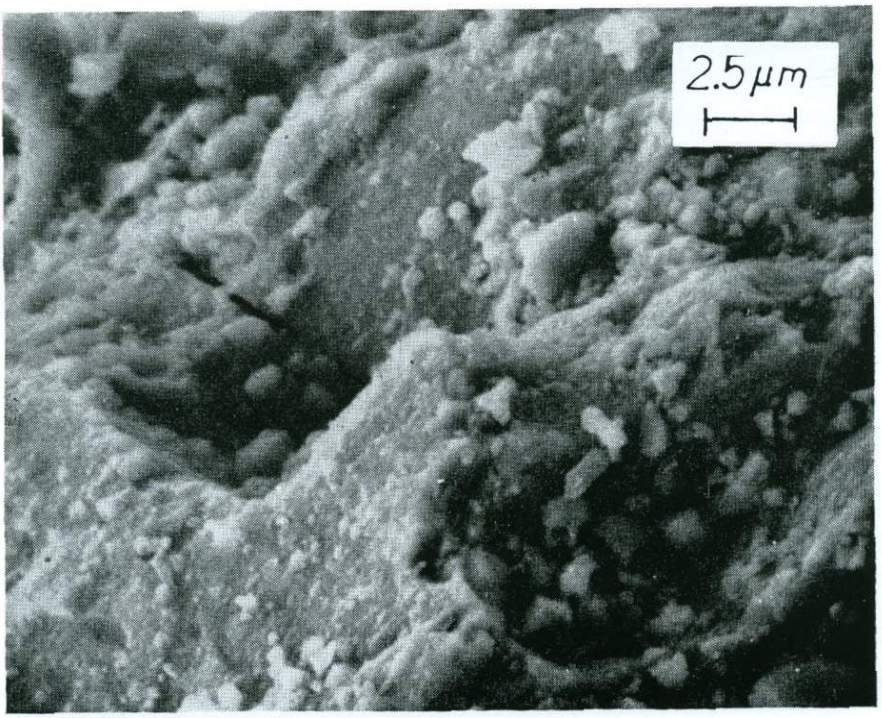
57. Part of plagioclase grain (enlarged right-hand portion of Fig. 47) with cleavage-controlled spallation and impact features. Note a low-velocity impact crater in the upper part, whose morphology is determined by the superposition of impact effect on the internal structure of plagioclase. Luna 20.

57. Участок поверхности зерна плагиоклаза (увеличенное изображение верхней правой части рис. 47). Структура поверхности обусловливается в основном сколами по спайности, осложненными ударными деформациями. В верхней части снимка фиксируется низкоскоростной ударный кратер, морфология которого определяется суперпозицией ударного воздействия и внутренней структуры плагиоклаза. „Луна-20".

58. Shock deformations on the plagioclase surface, partly filled with fine regolith dust. Luna 20.

58. Ударные деформации на поверхности плагиоклаза, частично заполненные мелкими зернами реголита. „Луна-20".


10μm

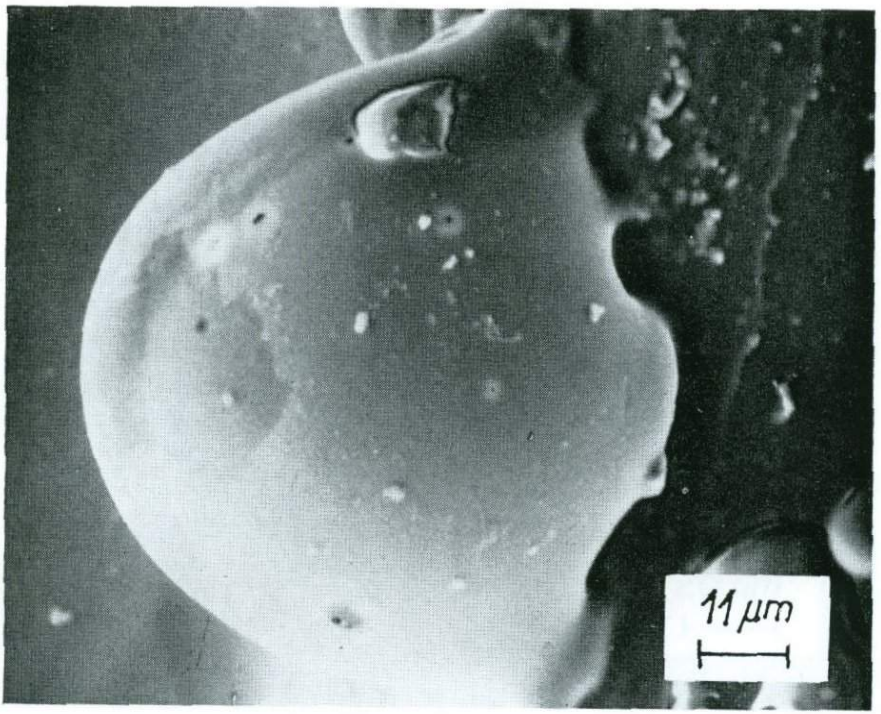

2.5μm

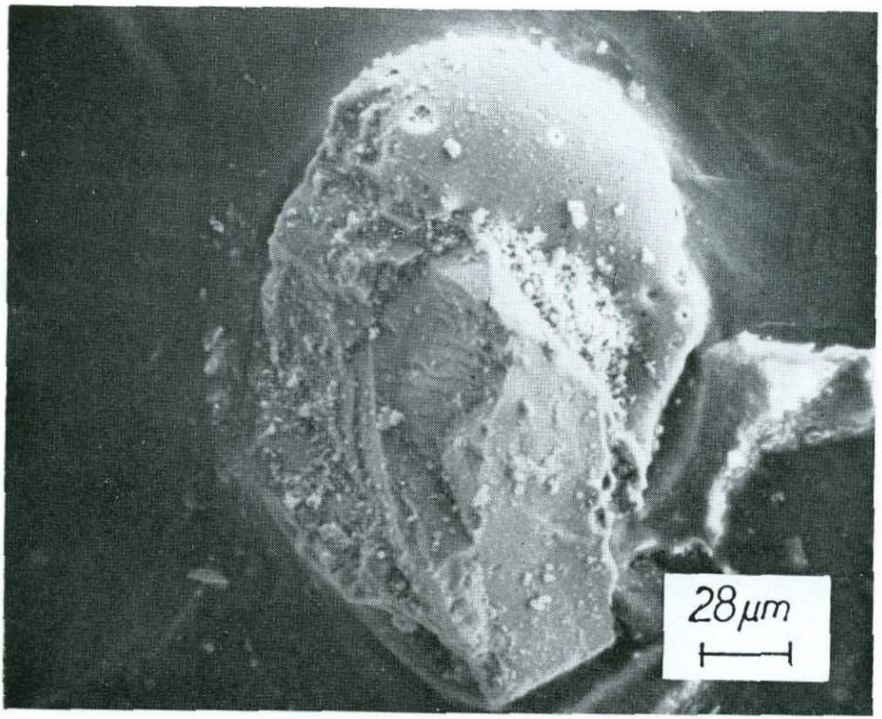
59. A drop of silicate melt of basaltic composition attached to the surface of plagioclase grain. The character of their contact indicates high viscosity of silicate melt. Luna 20.

59. Капля силикатного расплава базальтового состава на поверхности зерна плагиоклаза. Характер контакта свидетельствует о слабой смачиваемости расплавом подложки. „Луна-20".

60. Plagioclase grain embedded in silicate melt showing the history of a hard particle impact into plastic silicate material. Sharp contact between plagioclase grain and silicate substrate points to a relatively high rate of cooling of the melt. Luna 20.

60. Зерно плагиоклаза в затвердевшем силикатном расплаве — результат столкновения твердой частицы с вязким силикатным материалом. Четкий характер контакта частицы плагиоклаза с расплавом свидетельствует о большой скорости охлаждения последнего. „Луна-20".


11 μm


28 μm

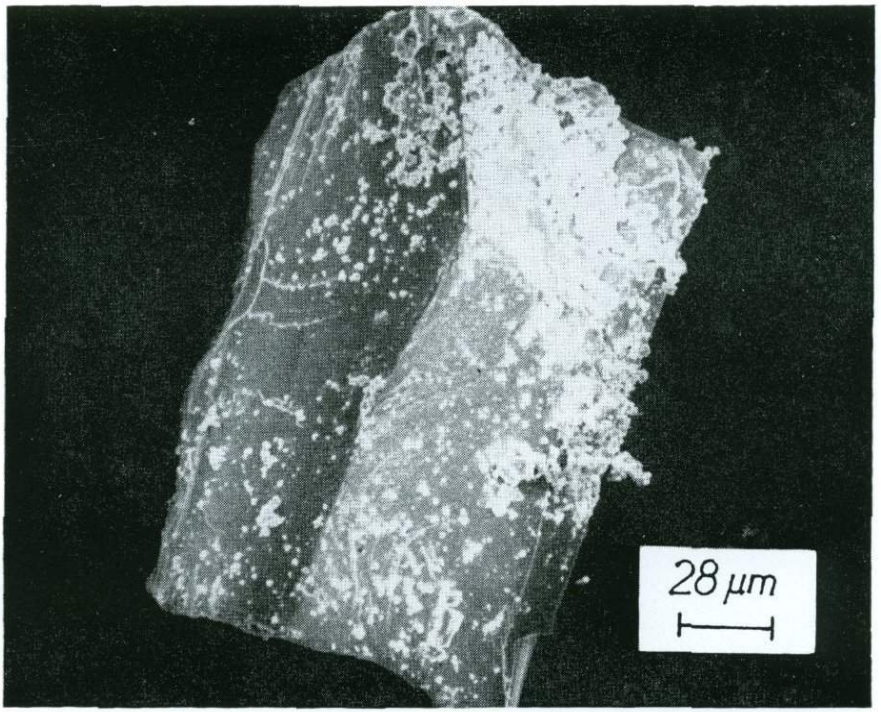
Olivines
Оливины

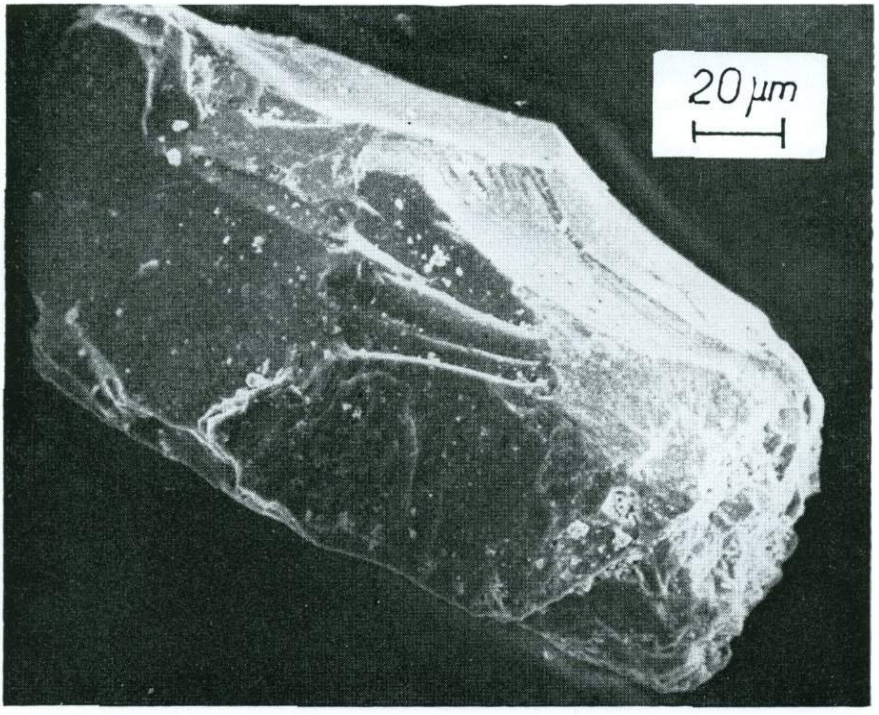
61. Olivine grain of typical elongated shape. Angular outline and fresh surface reveal that the fragment was not long exposed on the lunar surface. The relief of the olivine grain is complicated by small thin cracks (on the left) and attached fine regolith particles. Luna 20.

61. Общий вид зерна оливина типичной продолговатой формы. Остроугольные очертания и свежая поверхность зерна указывают на его относительно небольшое время пребывания на поверхности Луны. Рельеф зерна осложнен небольшими тонкими трещинками (на рисунке слева) и прилипшими частицами реголита. „Луна-20".

62. Olivine grain of markedly elongated form. The grain surface is characterized by the lack of angular features and by a conchoidal fracture. The presence of chip surfaces and pits (on upper left and right) and the rounded contours of the grain suggest a longer exposition on lunar surface relative to grain in Fig. 61. Luna 20.

62. Общий вид зерна оливина с четко выраженной удлиненной, продолговатой формой. Зерно отличается мягкими очертаниями. Для поверхности характерен раковистый излом. Наличие сколов и выбоин (на рисунке слева наверху и справа), а также сглаженные контуры зерна могут указывать на относительно большее, по сравнению с предыдущим зерном (рис. 61), время пребывания на лунной поверхности данного минерала. „Луна-20".


28 μm

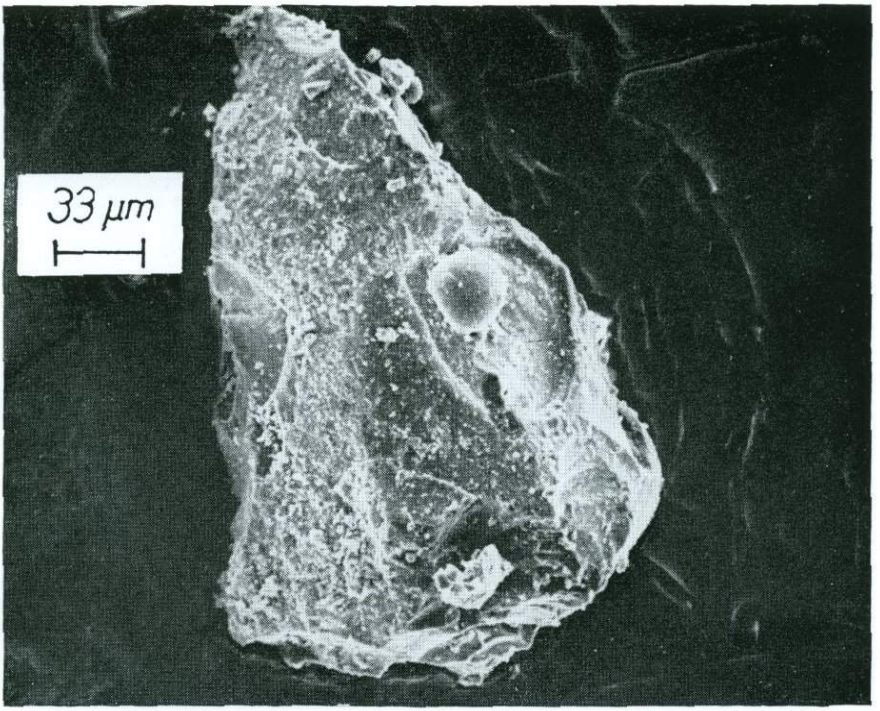

20 μm

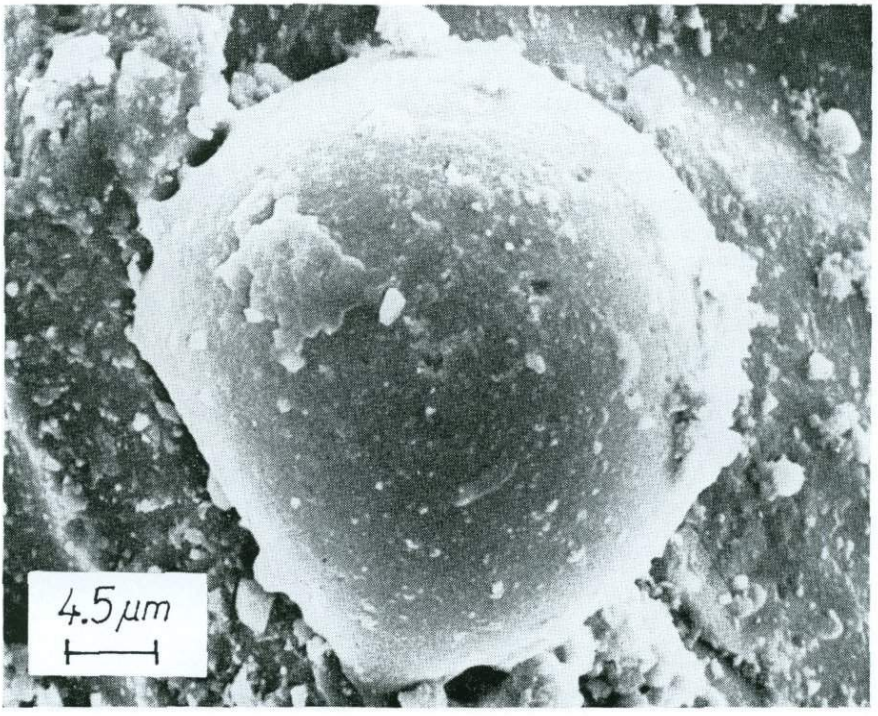
63. Olivine grain of irregular shape, which underwent strong exogenic reworking. The surface relief is characterized by numerous chip surfaces (along the whole periphery) and craters (in center). Spherical particle on the bottom of the shallow saucer-shaped crater is attached silicate lunar material melted during impact event. Luna 20.

63. Общий вид зерна оливина неправильной формы. Поверхность данного зерна подверглась интенсивной экзогенной переработке. Рельеф поверхности представлен многочисленными сколами (по всему контуру зерна) и кратерами (в центре). На дне мелкого блюдцеобразного кратера выделяется сферическая частица — прилипшая к поверхности оливина застывшая капля силикатного расплава, образовавшегося при ударном плавлении лунного вещества. „Луна-20".

64. Close-up of spherical silicate particle (enlarged central part of Fig. 63). Deformed shape of the particle and character of its contact with olivine suggest that the sphere impacted the olivine surface when it was in viscous state and still capable of plastic deformation. Luna 20.

64. Увеличенное изображение силикатной сферической частицы (центральная часть рис. 63). Деформированная форма частицы и характер ее контакта с оливином показывают, что частица упала на поверхность оливина в еще пластичном, вязком состоянии. „Луна-20".


33 μm

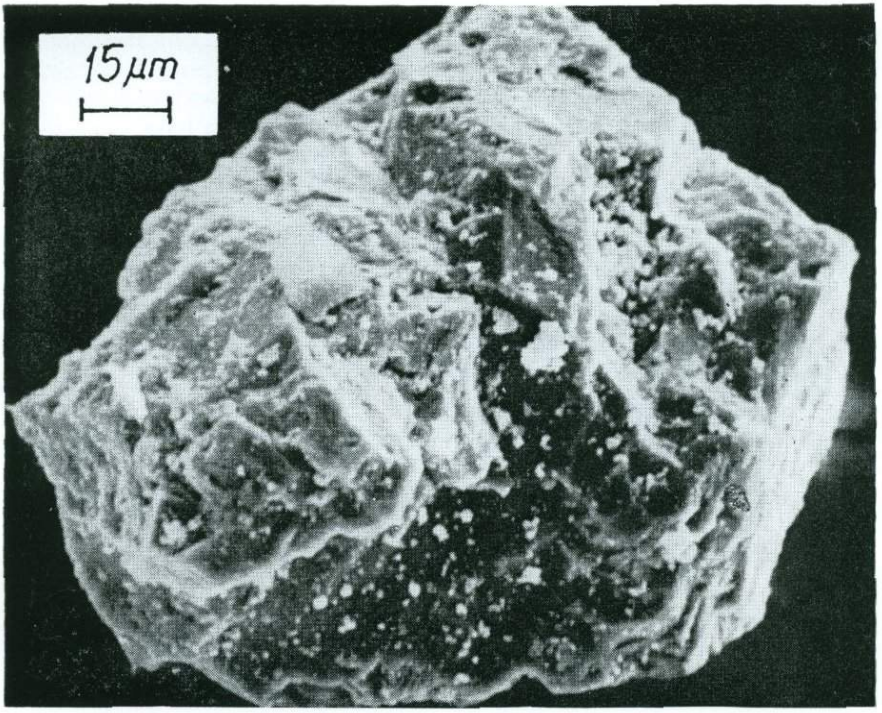

4.5 μm

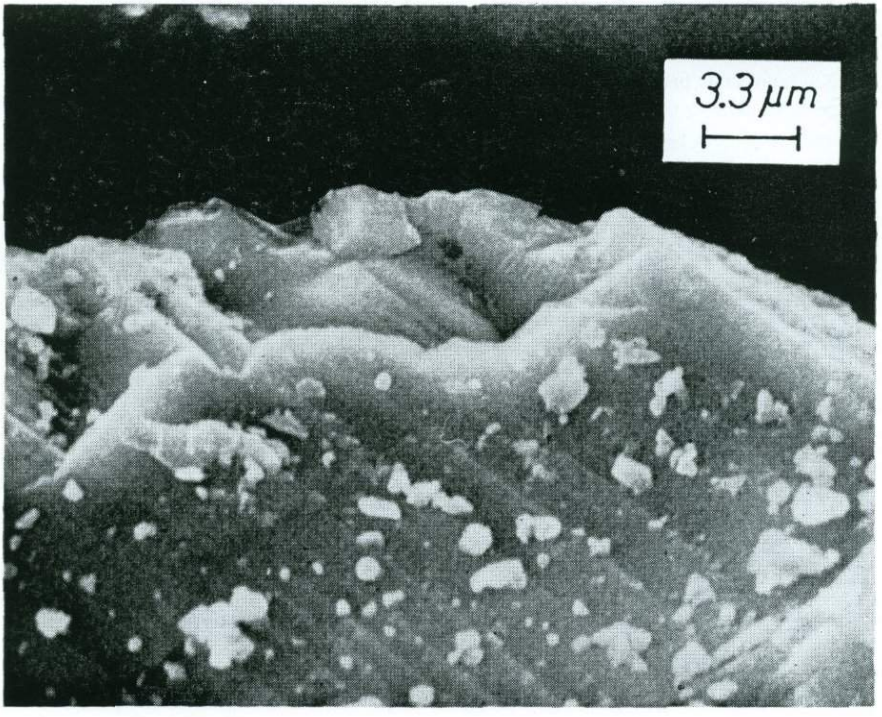
65. Olivine grain of irregular shape. Its composite relief dissected by numerous chip planes, pits and crater-like forms suggests that the fragment surface was intensely reworked. Luna 16.

65. Общий вид зерна оливина неправильной формы со сложным рельефом. Наблюдаются многочисленные сколы, выбоины, кратерообразные формы, свидетельствующие об интенсивной поверхностной переработке зерна. „Луна-16".

66. Enlarged detail of olivine grain (lower left part of Fig. 65, rotated by 180°) showing striation of the surface, possibly of inductive origin. On the margin is seen a deformation whose structural elements have rounded, partly melted forms implying superficial melting of the grain. Luna 16.

66. Участок поверхности зерна оливина (увеличенное изображение левой нижней части рис. 65, повернуто на 180°), со сложной штриховкой, имеющей, вероятно, индукционное происхождение. На границе зерна рельефно выделяется деформация, структурные элементы которой имеют плавные округлые очертания, обусловленные, по-видимому, частичным поверхностным плавлением вещества. „Луна-16".


15 μm

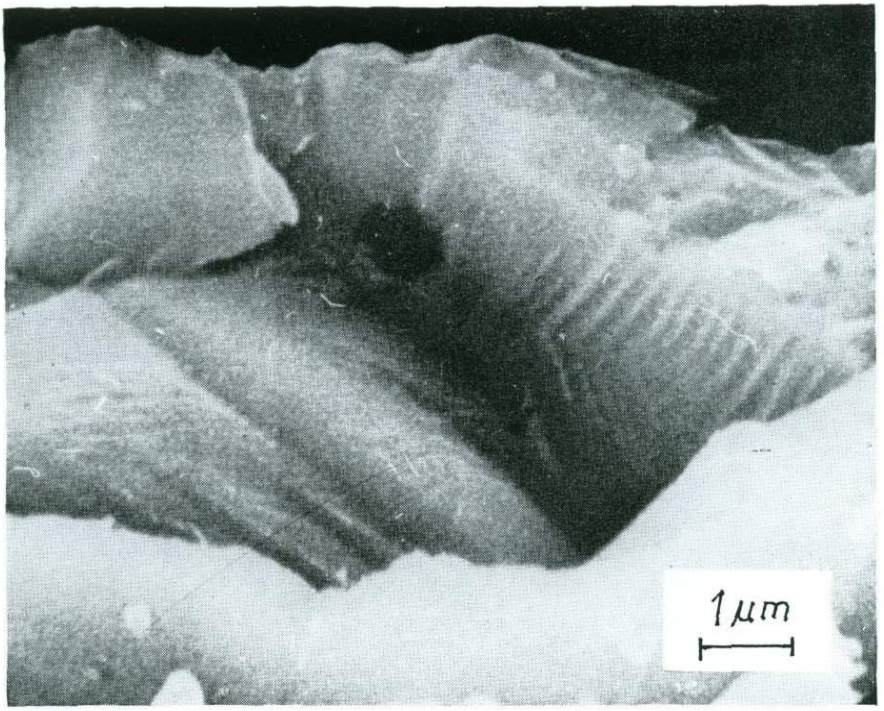

3.3 μm

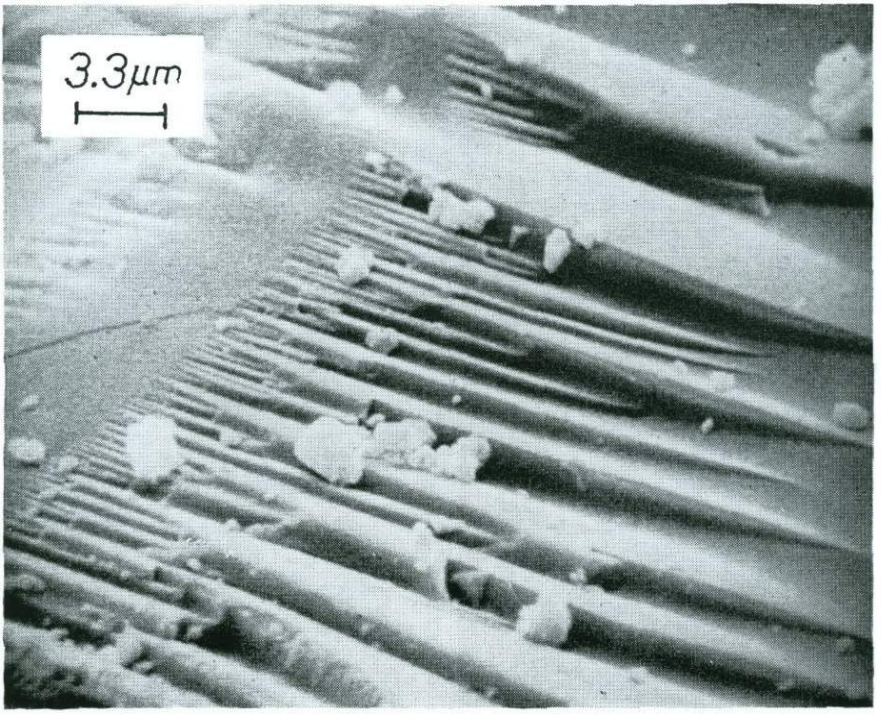
67. Enlarged detail of deformation shown in Fig. 66. Its generation may have been associated either with impact event or with escape of enclosed gas. Accordingly, parallel striation on the wall of the rim is either the result of shock twinning or of cooling of the material containing the gas inclusion. Luna 16.

67. Увеличенное изображение деформации зерна оливина (рис. 66). Образование деформации может быть связано либо с ударным процессом, либо с вскрытием газового включения. В таком случае хорошо заметная на валу параллельная штриховка является результатом либо ударного двойникования оливина, либо остывания материала, содержащего газовое включение. „Луна-16".

68. Wedge-shaped striae form protrusions on the olivine surface. Such relief may be caused by impact-produced shifts in crystal lattice. Luna 16.

68. Клиновидные штрихи — выступы на грани оливина. Образование подобного рельефа может быть, очевидно, вызвано сдвигами в кристаллической решетке при ударном воздействии. „Луна-16".


1μm

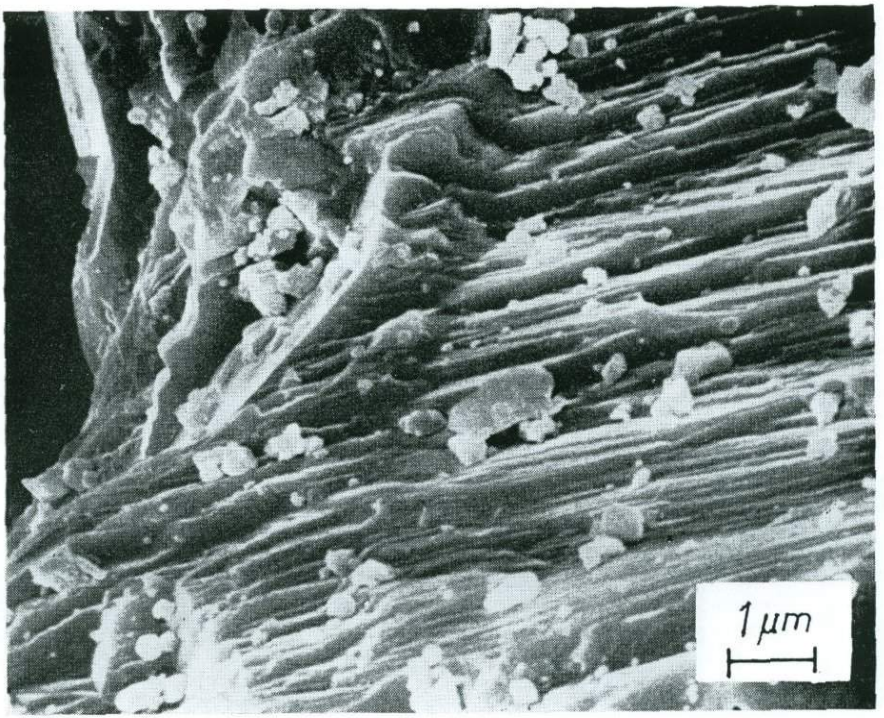

3.3μm

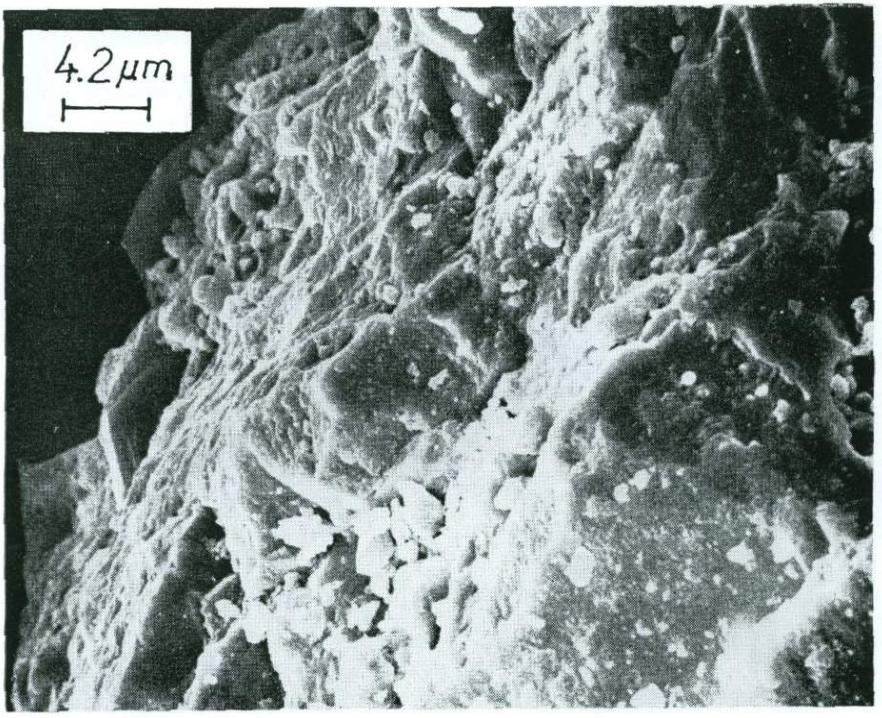
69. Part of olivine surface with protruding sharp, ribbed forms suggestive of impact events. Luna 20.

69. Участок поверхности оливина с рельефно выступающими резко выраженными ребристыми формами, образование которых является, видимо, результатом ударного воздействия. „Луна-20".

70. Olivine surface relief characterized by angular forms and protrusions, mostly with smooth and rounded margins. The rounding may be the result of partial surface melting of the material. Note also shallow impact depressions on the grain surface. Luna 16.

70. Участок поверхности зерна оливина, рельеф которого определяется ребристыми формами и выступами, нередко имеющими мягкие, плавные очертания, обусловленные, возможно, частичным поверхностным плавлением вещества. Следует отметить также мелкие ударные деформации на поверхности зерна. „Луна-16".


1 μm

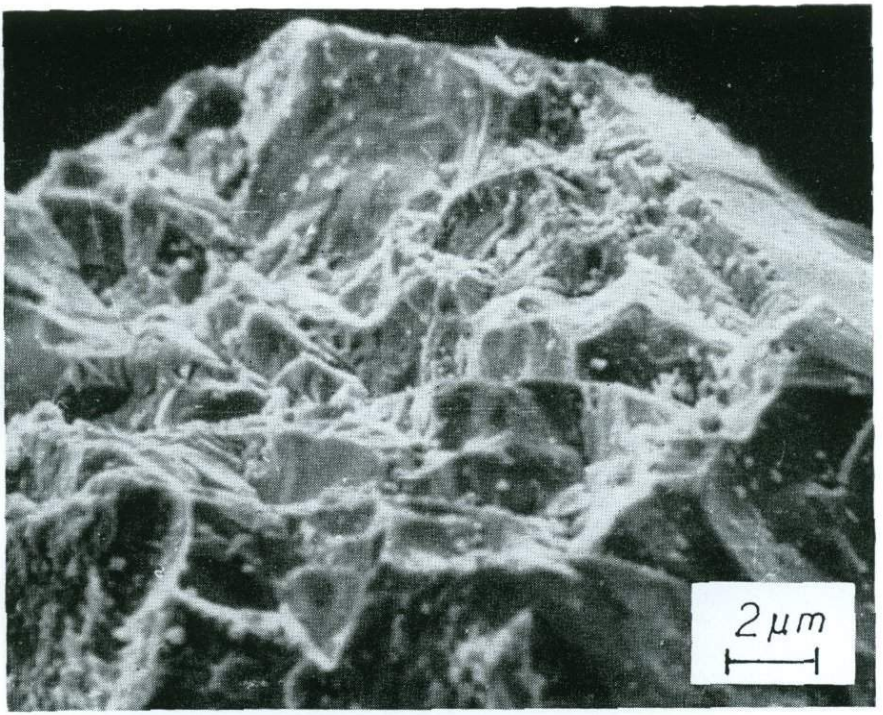

4.2 μm

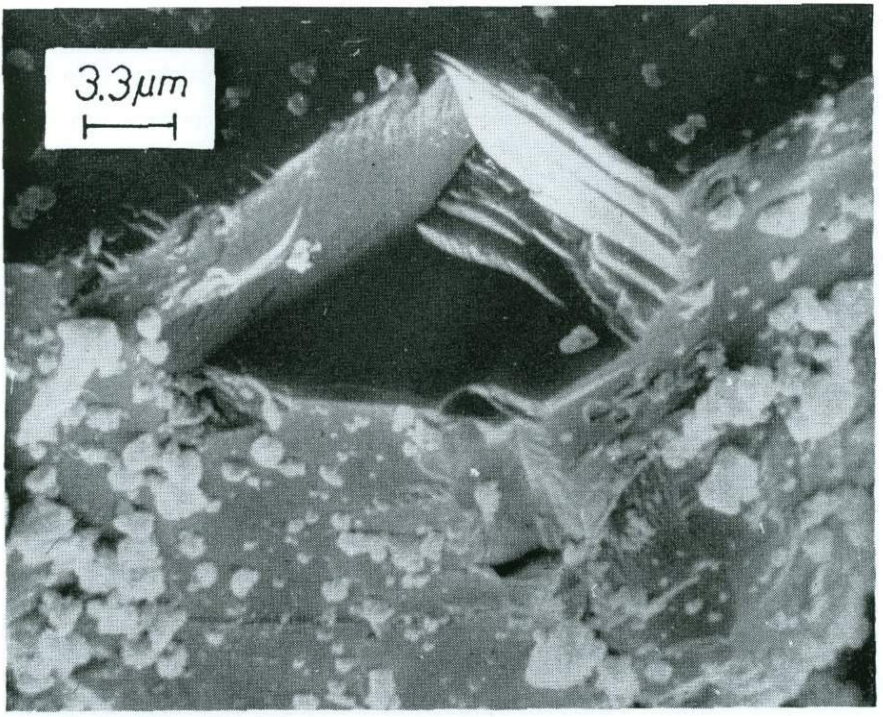
71. Olivine grain, part of which was broken off. Surface relief is typical of deformation caused by low-energy impacts. The chip surface shows numerous angular protrusions in the central part of the impact deformation and conchoidal fracture on the periphery. Luna 16.

71. Участок поверхности зерна оливина с типичной для низкой концентрации энергии формой скола. В центре ударной деформации скол характеризуется наличием многочисленных остроугольных выступов; по периферии поверхность скола имеет типичный раковистый излом. „Луна-16".

72. Troilite inclusion in olivine grain. Troilite seems to have not crystal faces of its own. Luna 20.

72. Включение троилита в зерне оливина. В данном случае троилит, вероятно, не имеет собственной огранки. „Луна-20".


2μm


3.3μm

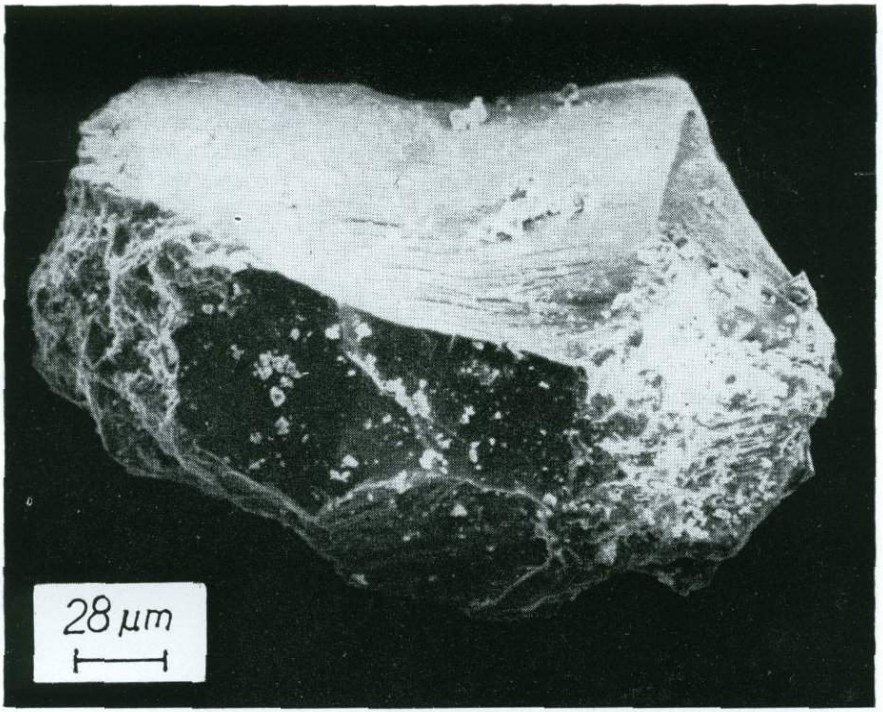
Pyroxenes
Пироксены

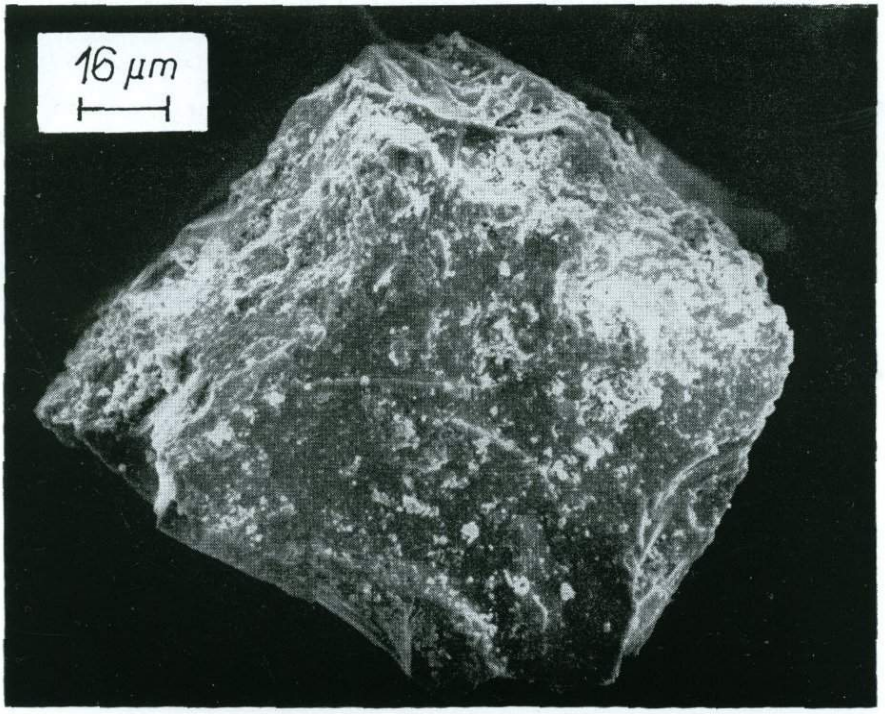
73. Pyroxene grain of elongated shape. Grain surface has been markedly deformed by secondary alterations, only part of prismatic face is relatively well preserved. Both lateral sides are markedly transformed by impacts. Regolith dust particles are attached on the upper conchoidal surface. Luna 20.

73. Зерно пироксена продолговатой формы. Поверхность зерна заметно изменена последующим разрушением. Относительно неплохо сохранился только участок призматической грани. Правая и левая части зерна заметно преобразованы ударами. Наверху рельефно выделяется поверхность раковистого скола с прилипщими частицами реголита. „Луна-20".

74. Orthopyroxene grain of roughly isometric form. Both form and surface of the grain were substantially affected by impacts so that the original crystal faces are not preserved. Abundant impact deformations are seen along the periphery. Luna 16.

74. Зерно ортопироксена относительно изометричной формы. Форма и поверхность зерна существенно изменены ударами. Первичная кристаллографическая огранка не сохранилась. По периферии зерна наблюдаются многочисленные ударные деформации. „Луна-16".


28 µm

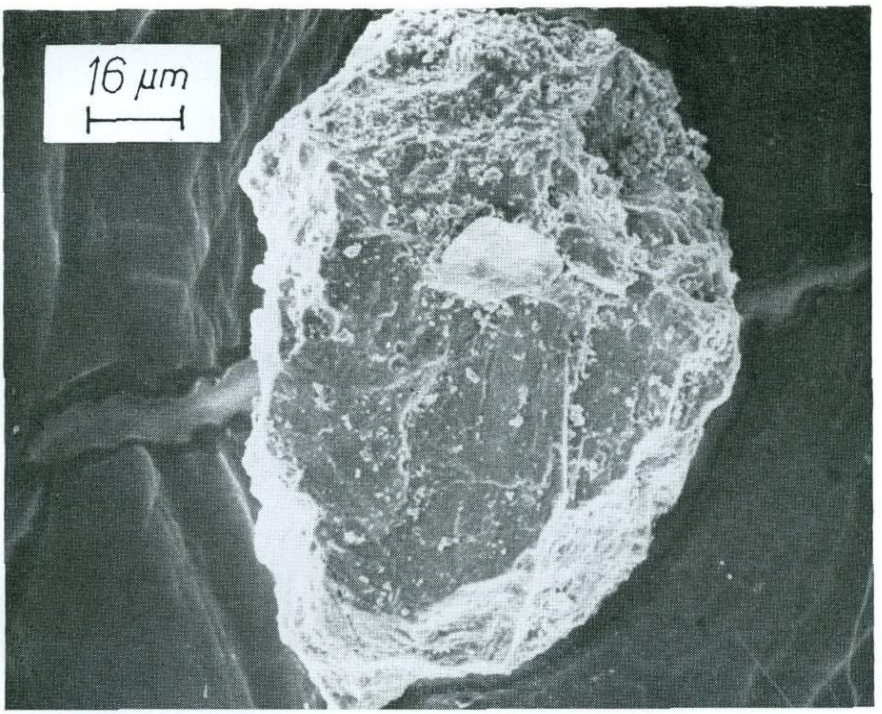

16 µm

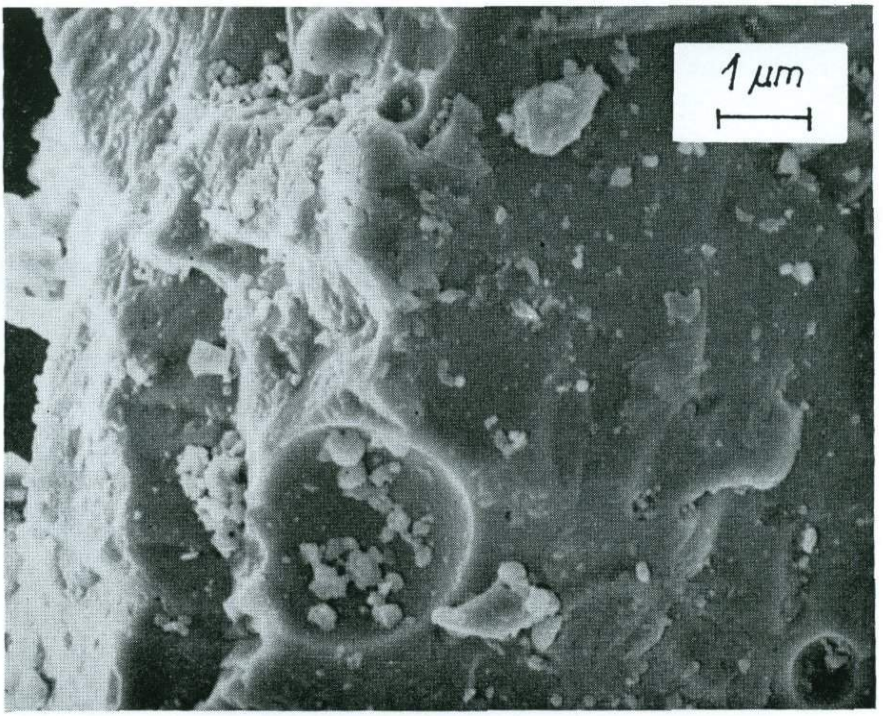
75. Orthopyroxene grain of irregular shape. Grain surface is strongly modified, particularly in the upper part. Prominent, relatively deep impact crater with steep walls is clearly seen on the upper right. Another impact crater with well developed morphological features — relatively shallow pit, well developed rim and spall zone — occurs to the left of the former. Morphology of both craters suggests that high-velocity impacts were involved in their formation. The front side of the grain on the right is probably formed by cleavage planes, and on the left it shows splashes of silicate material. Luna 16.

75. Зерно ортопироксена неправильной формы с заметно измененной поверхностью. Особенно интенсивному разрушению подверглась верхняя часть зерна. Наверху справа отчетливо выделяется хорошо выраженный сравнительно глубокий ударный кратер с крутыми стенками. Слева от него расположен другой ударный кратер с развитыми морфологическими элементами: относительно неглубокой центральной воронкой, хорошо прослеживающимся валом и заметной зоной откола. Морфология кратеров свидетельствует об образовании их при высокоскоростных ударах. Справа поверхность пироксена определяется, вероятно, сколами по спайности. Левая часть поверхности зерна осложнена набрызгом силикатного материала. „Луна-16".

76. Enlarged left central part of Fig. 75 demonstrates a silicate splash with hummocky surface and holes produced during outgassing of the melt. Original pyroxene surface with cleavage fractures can be seen in the left marginal portion. Luna 16.

76. Увеличенное изображение левой средней части рис. 75. Набрызг силикатного материала с неровной бугристой поверхностью и образовавшимися при дегазации расплава лунками. Слева по периферии зерна заметен участок поверхности пироксена с трещинами спайности. „Луна-16".


16 μm

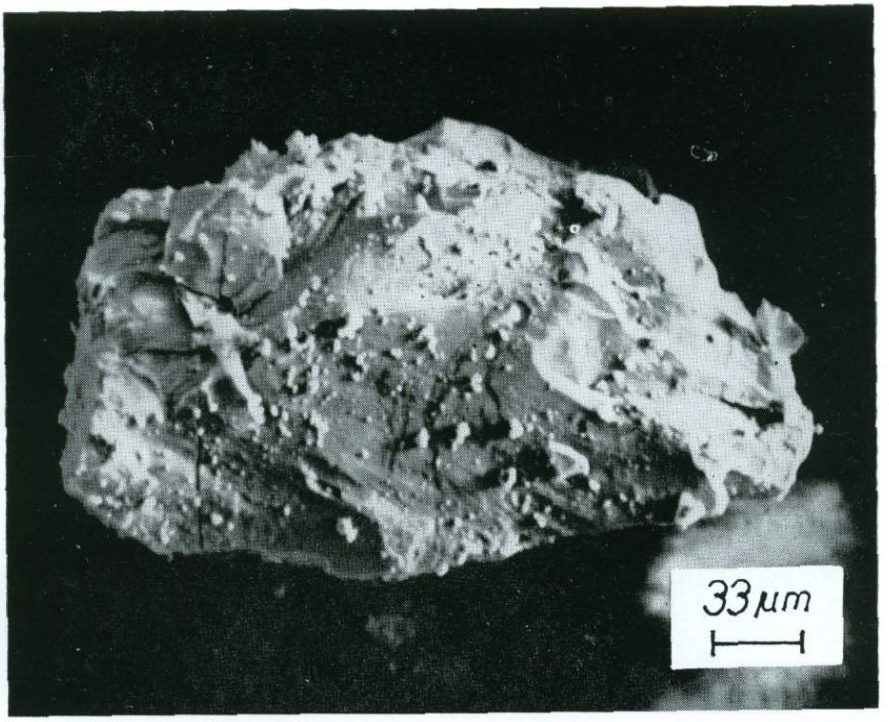

1 μm

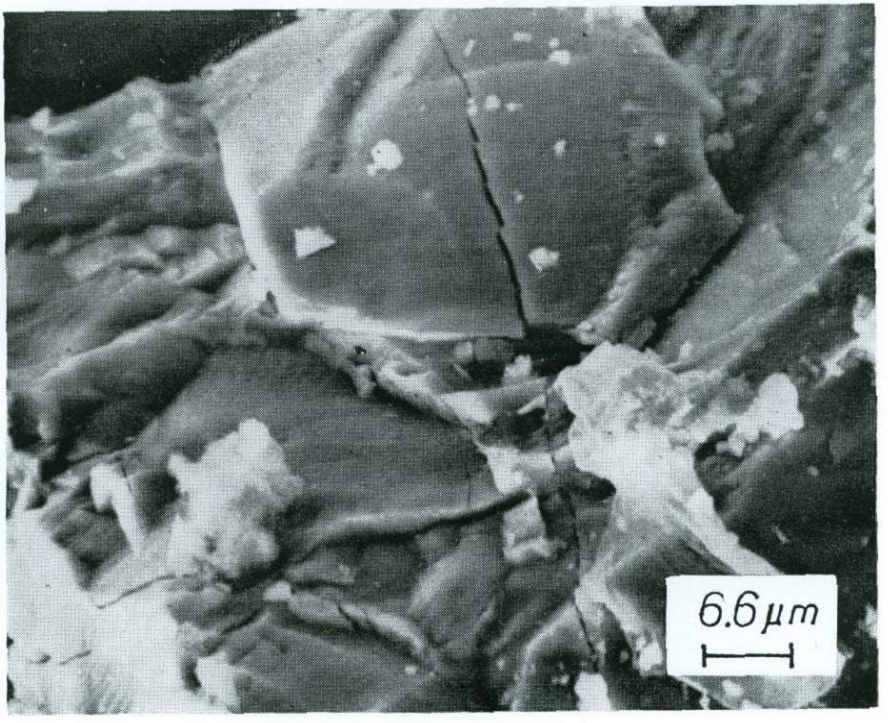
77. Clinopyroxene grain of elongated form, which is not bounded by its own crystal faces. Grain surface is diversified by conchoidal fractures and cracks. Luna 20.

77. Зерно клинопироксена удлиненной формы с отсутствием кристаллической огранки, с раковистыми сколами и трещиноватостью поверхности. „Луна-20".

78. Enlarged upper left part of Fig. 77, showing clear-cut traces of impacting. Step-like crack cuts across the grain and very fine striae run at right angles to it. Striation *may be due to impact event or be associated with internal structure of clinopyroxene*, i.e. with the decomposition of clinopyroxene into augite and pigeonite. Luna 20.

78. Увеличенное изображение верхнего левого участка рис. 77. Зерно клинопироксена несет заметные следы удара. На переднем плане резко выделяется трещина по спайности, имеющая ступенчатый характер. Перпендикулярно трещине наблюдается хорошо выраженная тонкая штриховка, образование которой может быть связано либо с ударным воздействием, либо с внутренней структурой распада клинопироксена на авгит и пижонит. „Луна-20".


33 μm

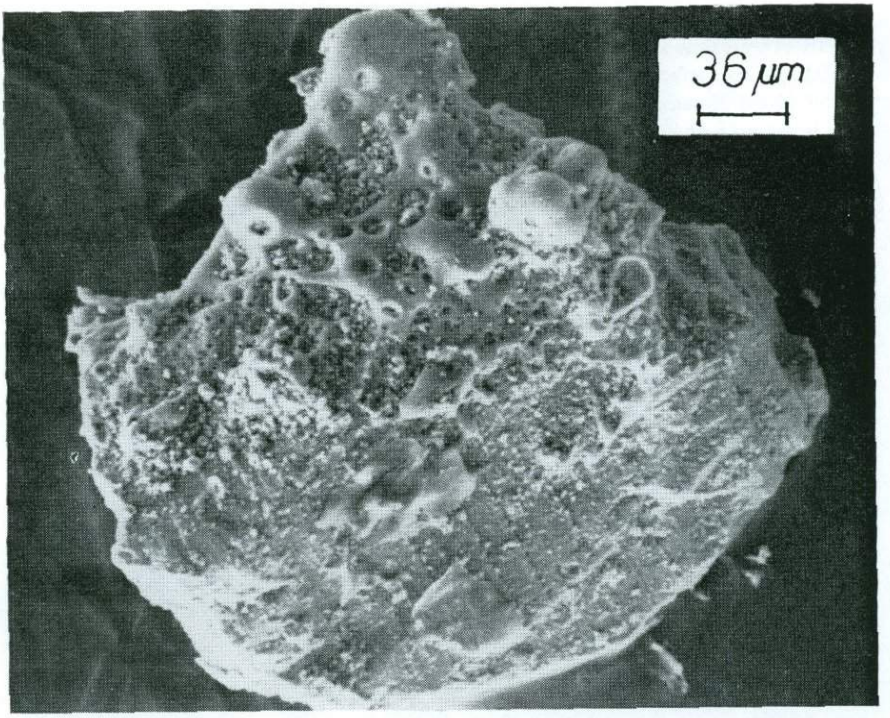

6.6 μm

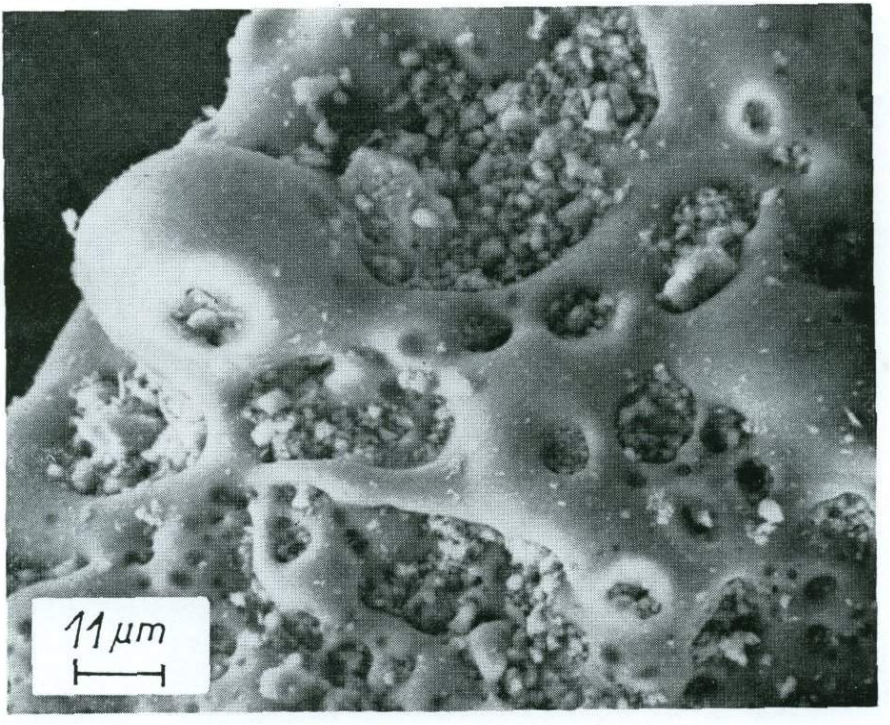
79. *Orthopyroxene grain, the* upper part of which is covered with welded fine regolith particles and splashes of silicate material. The surface relief is also determined by chip planes developed along the cleavage. Luna 20.

79. Зерно ортопироксена, значительная часть поверхности которого (верхняя часть) покрыта мелкими спекшимися частицами реголита и набрызгом силикатного расплава. Рельеф поверхности определяется также сколами по спайности. На передней поверхности зерна заметны следы спайности. „Луна-20".

80. Enlarged upper portion of orthopyroxene grain shown in Fig. 79. Note fine regolith particles attached to the pyroxene surface at a meteoritic impact event and silicate splashes covering parts of the uneven substrate. Luna 20.

80. Увеличенное изображение верхней части зерна ортопироксена (рис. 79). На мелких частицах реголита, спекшихся с поверхностью пироксена при метеоритном ударе, набрызг силикатного расплава, частично покрывающего неровную поверхность подложки. „Луна-20".


36 μm

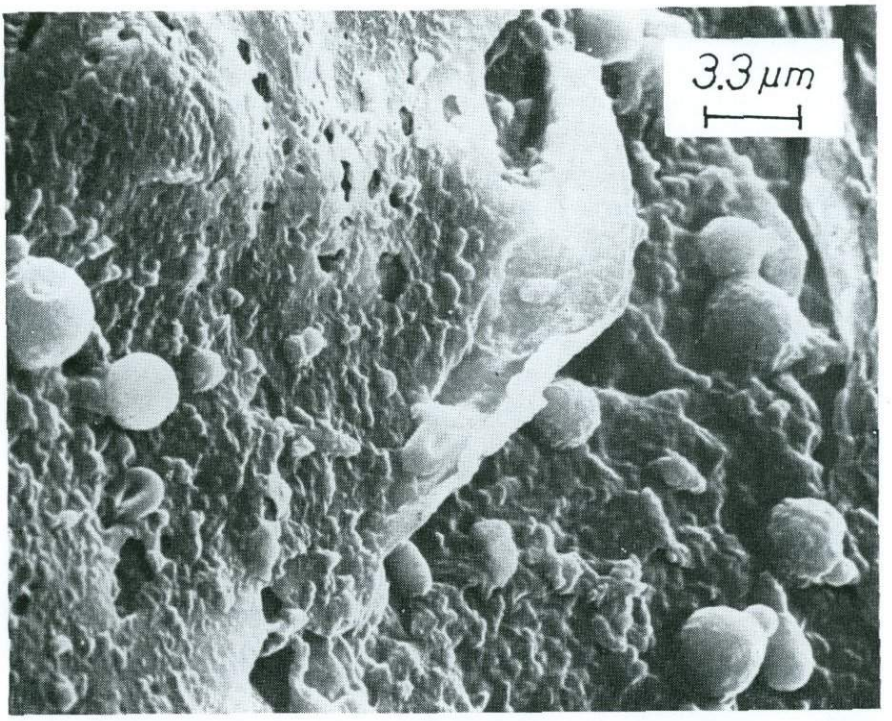

11 μm

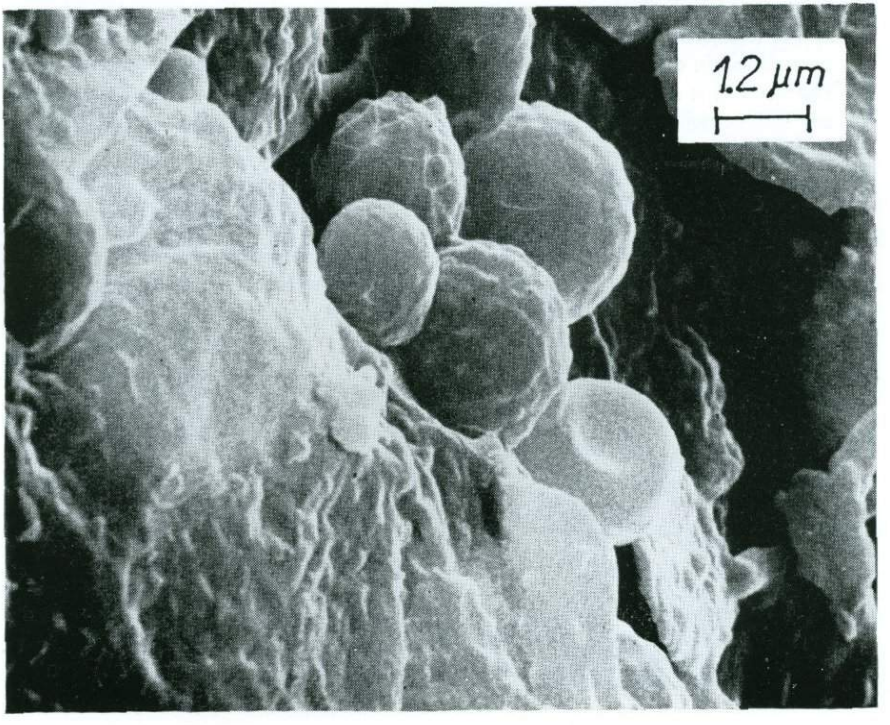
81. Part of pyroxene surface, covered with thin coating of essentially iron composition. The coating surface is undulated and hummocky with pores of irregular shape and varied dimensions. The coating is formed by splashed melt of Fe composition. It is dotted with spherical particles corresponding in composition to metallic iron. The spherules were produced as a result of liquation or gas condensation. Luna 20.

81. Участок поверхности клинопироксена, покрытый коркой существенно железистого состава. Рельеф корки неровный, мелковолнистый и бугорчатый, с порами неправильной конфигурации различного размера. На поверхности корки наблюдаются сферические частицы, по составу отвечающие металлическому железу. Корка является набрызгом расплава Fe-состава. Сферические частицы образовались, очевидно, либо в результате ликвации, либо при конденсации из газовой фазы. „Луна-20".

82. Part of pyroxene surface with thin coating and spherical particles of iron composition. The evidently similar character of the coating and the spherules is consistent with the similarity in their chemical composition. Luna 20.

82. Участок поверхности клинопироксена с коркой и сферическими частицами Fe-состава. Хорошо заметна однотипность поверхности корки и сферических частиц, что согласуется с близостью их химического состава. „Луна-20".


3.3 μm

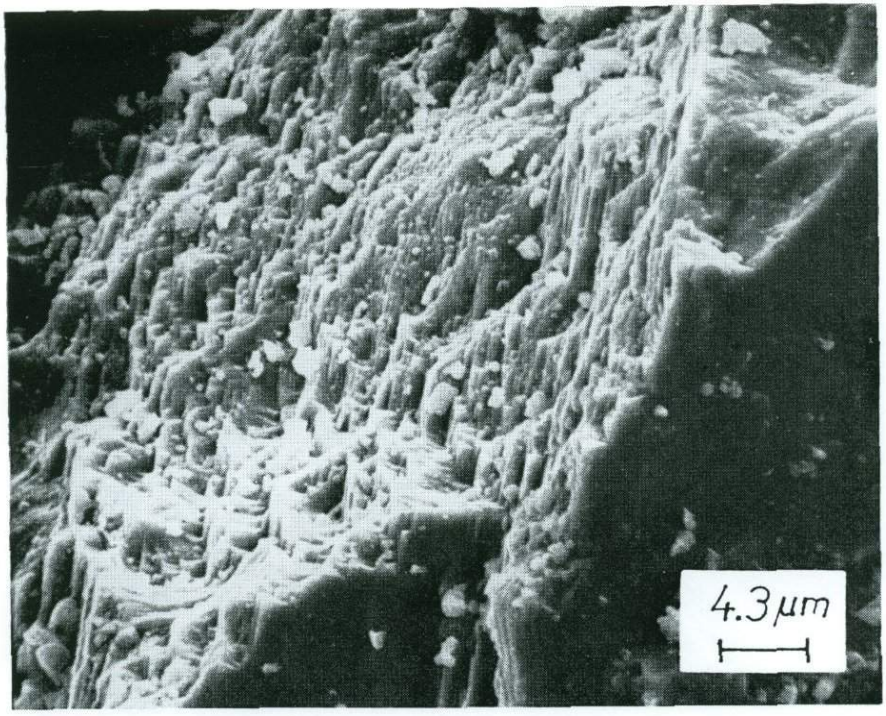

1.2 μm

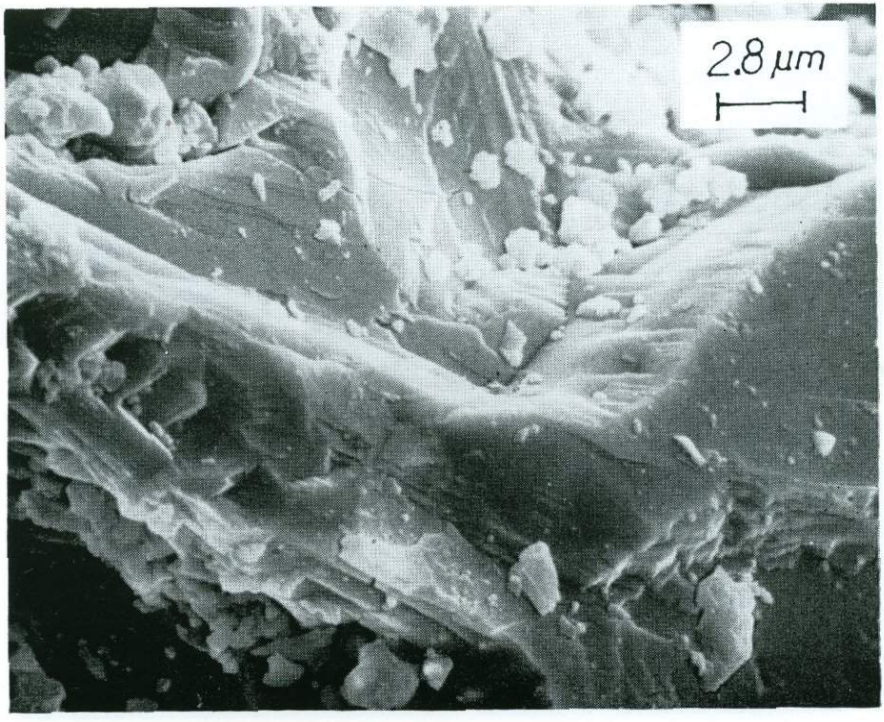
83. Part of clinopyroxene surface showing impact-produced deformation. The relief of the part shown is characterized by the chip surfaces along cleavage and markedly ribbed nature; it bears microcraters whose morphology often depends on the pyroxene cleavage. Luna 16.

83. Участок поверхности клинопироксена с ударной деформацией. Рельеф участка в значительной степени определяется сколами по спайности в результате ударного (вероятно, неоднократного) воздействия. Поверхность деформации отличается ребристым характером и наличием микрократеров, морфология которых часто существенно зависит от спайности пироксена. „Луна-16".

84. Part of relatively fresh pyroxene grain. Uneven surface relief in the central portion is due to concomitant growth of pyroxene and adjacent minerals during crystallization of basaltic magma. Striation of the surface may be of inductive character or it may have resulted from decomposition processes. Traces of impacts are seen in the lower left part of the grain. Morphology of impact deformation is often modified by the chip surfaces along pyroxene cleavage planes. Luna 16.

84. Участок поверхности клинопироксена сравнительно свежего облика. Неровность рельефа зерна в центральной части рисунка вызвана совместным ростом пироксена с соседними минеральными зернами при кристаллизации базальтовой магмы. Наблюдаемая на поверхности штриховка может иметь либо индукционный характер, либо быть связана с явлением распада. Некоторые участки зерна (нижняя левая часть рисунка) несут следы ударного воздействия. Морфология ударных форм часто определяется сколами по спайности пироксена. „Луна-16".


4.3 μm

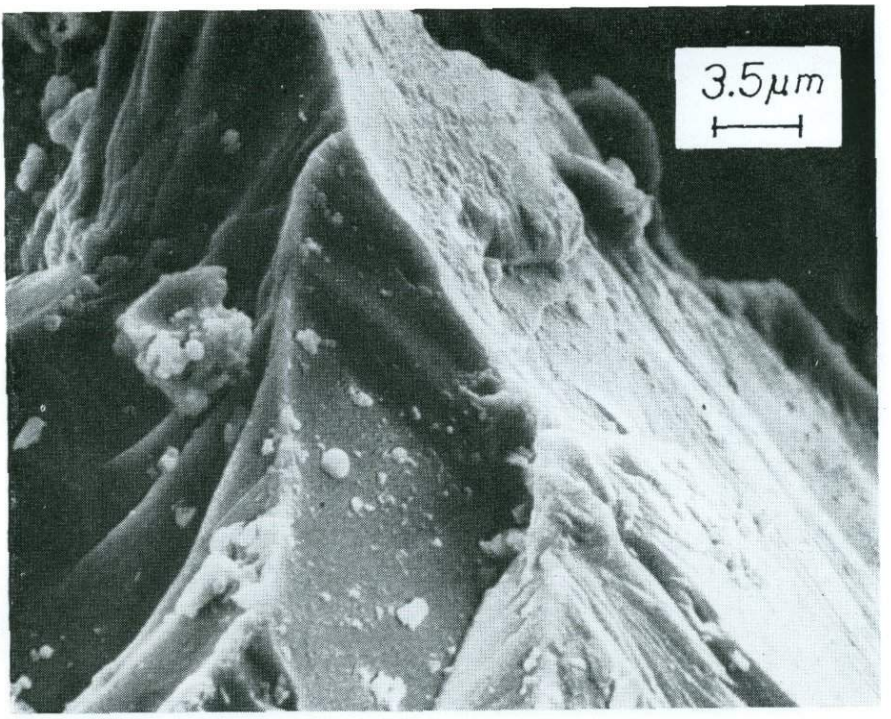

2.8 μm

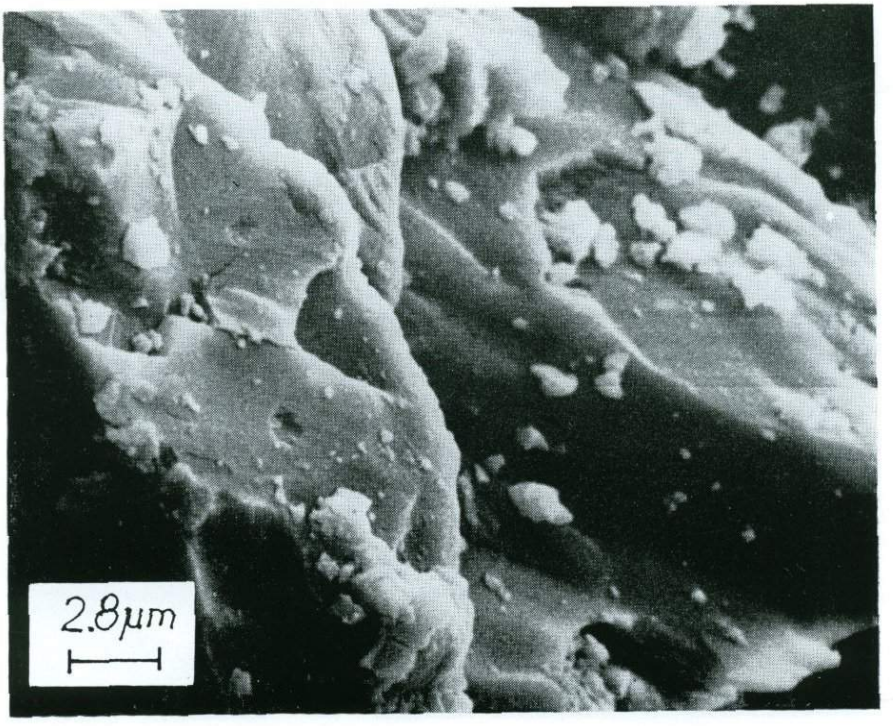
85. Part of pyroxene surface of relatively fresh appearance. The configuration of the pyroxene surface is affected to a certain extent by the morphology of adjacent minerals which crystallized simultaneously with pyroxene. Luna 20.

85. Участок относительно свежей поверхности клинопироксена, общая морфология поверхности которой в основной обусловлена морфологией соседних минералов, кристаллизовавшихся совместно с пироксеном. „Луна-20".

86. Part of clinopyroxene surface characterized by mild rounded contours. The grain shows an impact history whose traces are apparent in the form of pits of variable shape and size. Luna 20.

86. Участок поверхности клинопироксена, отличающийся мягкими, плавными очертаниями. Зерно подверглось ударной обработке, следы которой в виде выколок разнообразной формы и различного размера отчетливо видны на его поверхности. „Луна-20".


3.5μm


2.8μm

SECONDARY ROCKS AND SECONDARY FORMATIONS
ВТОРИЧНЫЕ ПОРОДЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

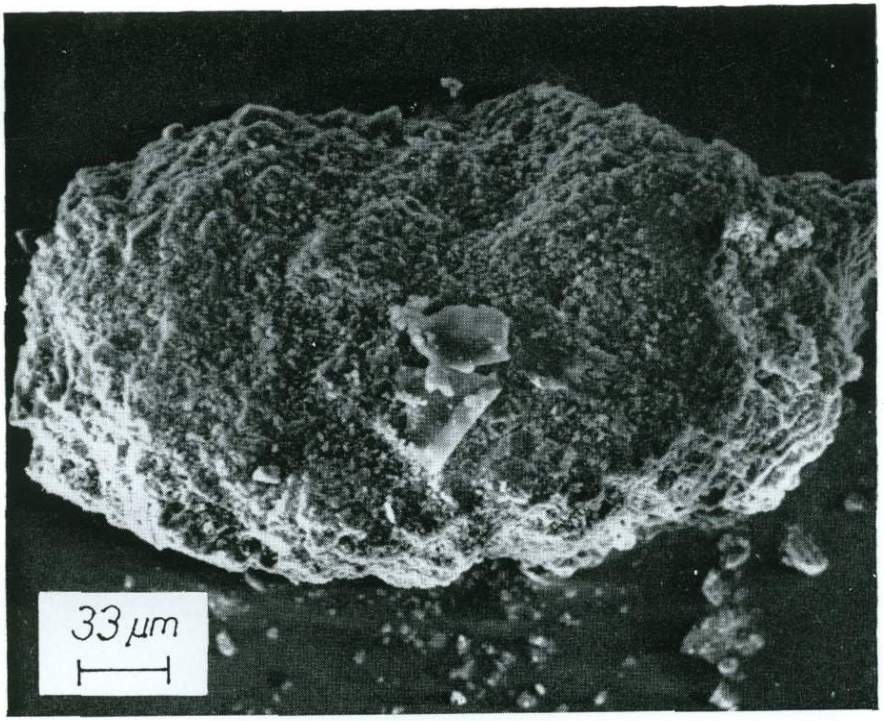
Breccias
Брекчии

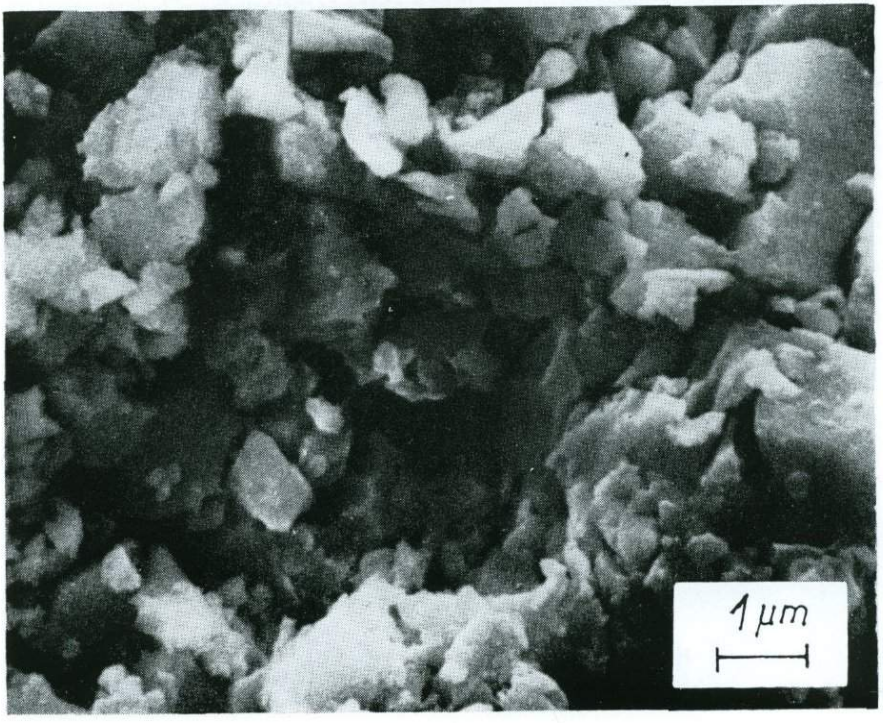
87. Fragment of regolith breccia from a lunar highland area, strongly reworked by lunar erosion. The surface is pitted by numerous impact depressions and covered with attached regolith particles of various sizes; they are not very marked because of small cohesion of breccia clasts. Luna 20.

87. Обломок реголитовой брекчии из материкового района Луны, существенно переработанный лунным выветриванием. Общий характер рельефа демонстрируемого фрагмента определяется многочисленными ударными депрессиями и прилипшими к поверхности зернами реголита различного размера, выраженными не совсем четко за счет непрочного сцепления зерен брекчии. „Луна-20".

88. Enlarged detail of the central part of Fig. 87 showing a low-velocity impact depression on the breccia surface. The impact of projectile and formation of depression were not accompanied by melting of the rock. The picture shows distinct breccia texture, well packed regolith fragments of various sizes and shapes, but flat forms typical of plagioclase grains predominate. Luna 20.

88. Увелнченное изображение низкоскоростной ударной депрессии на поверхности брекчии (центральная часть рис. 87). Удар частицы — „снаряда" и образование депрессии не сопровождались плавлением породы. Рисунок четко демонстрирует строение брекчии — хорошую упаковку зерен реголита широкого спектра размеров и разнообразной формы. Следует однако отметить, что преобладающей формой частиц является уплощенная форма, свойственная монозернам плагиоклаза. „Луна-20".


33 μm

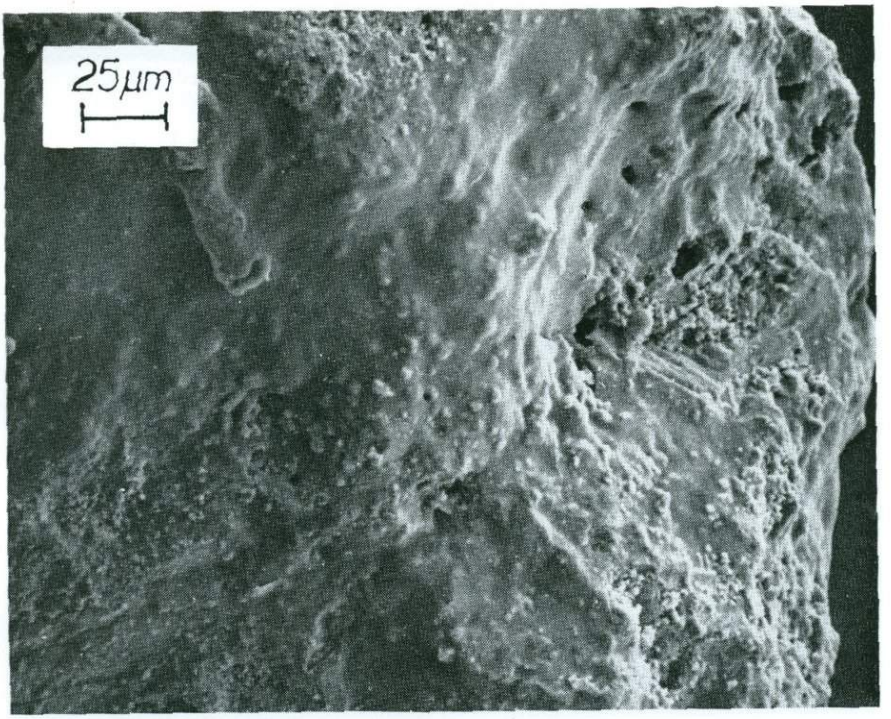

1 μm

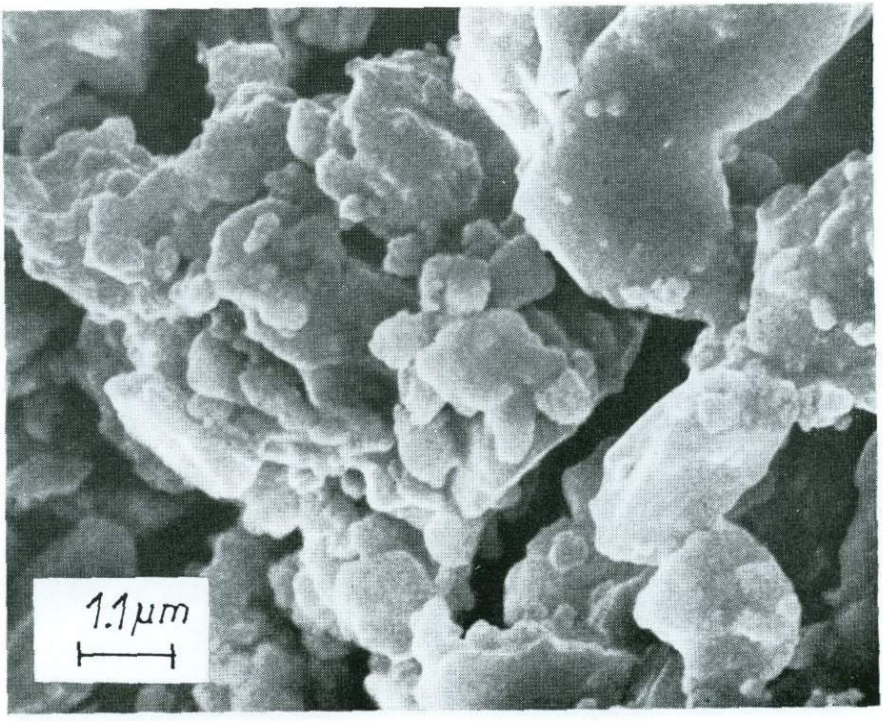
89. Impact crater on the surface of relatively hard regolith breccia fragment. The impact caused partial melting of the target. Melted material formed a porous coating of the crater walls and a greater part of the well developed rim. Luna 20.

89. Ударный кратер на поверхности относительно плотного фрагмента реголитовой брекчии. Удар вызвал частичное плавление вещества мишени. Расплавленный материал в виде застывшей пористой корки покрывает стенки кратера, а также большую часть хорошо выраженного вала. „Луна-20".

90. Enlarged detail of unmelted lower left part of the particle in Fig. 89, demonstrating the texture of regolith breccia. Flattened plagioclase grains are the main component of the rock. Luna 20.

90. Увеличенное изображение неоплавленной нижней левой части частицы на рис. 89, показывающее структуру реголитовой брекчии. Зерна плагиоклаза уплощенной формы являются основным компонентом представленного фрагмента. „Луна-20".


25μm

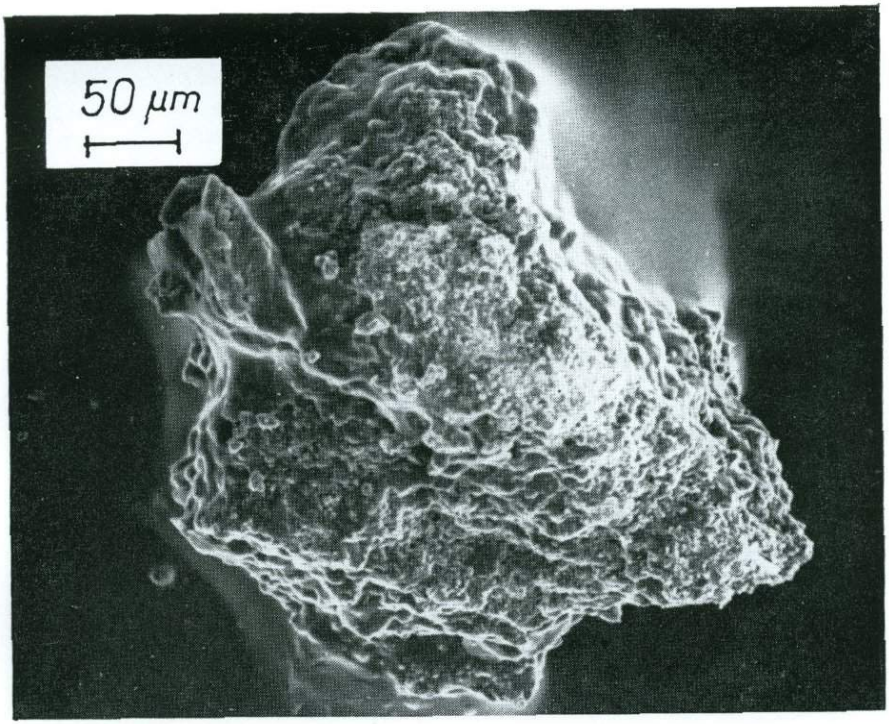

1.1μm

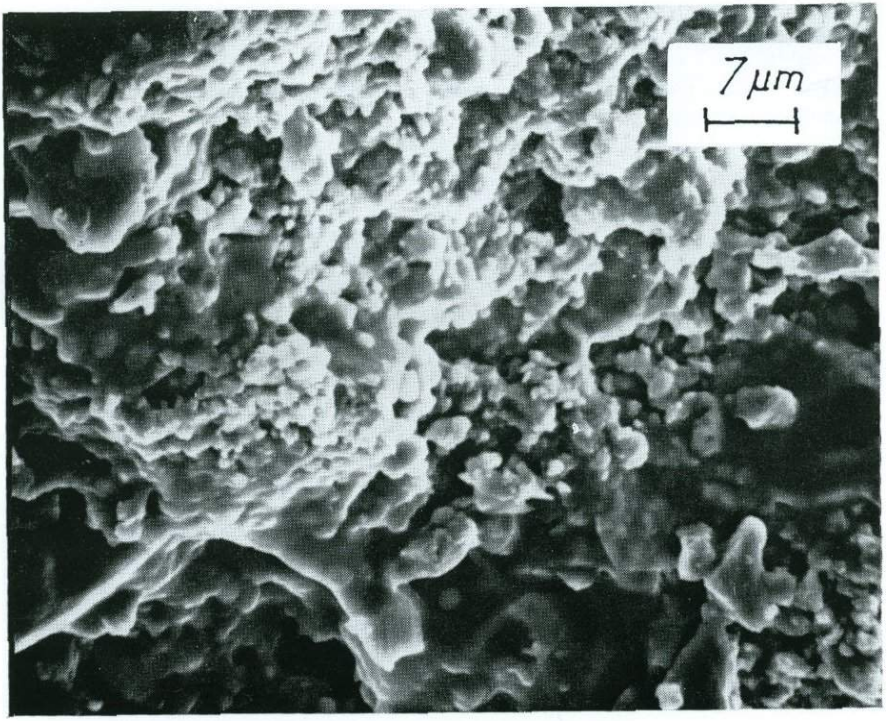
91. Overview of regolith breccia fragment of irregular shape. The fragment surface is uneven, hummocky and in places (especially on the left) coated with glass. Luna 20.

91. *Общий вид фрагмента реголитовой брекчии неправильной формы. Поверхность* в основном неровная, бугристая, местами (преимущественно в левой части снимка) покрыта стеклом. „Луна-20".

92. Enlarged view of the central part of breccia fragment in Fig. 91. The surface of the fragment is composed of partly melted fine regolith particles of various forms and dimensions, cemented by glass. Luna 20.

92. Увеличенное изображение средней части рис. 91. Поверхность фрагмента брекчии сложена оплавленными частицами тонкой фракции реголита различных формы и размера, сцементированными стеклом. „Луна-20".


50 μm

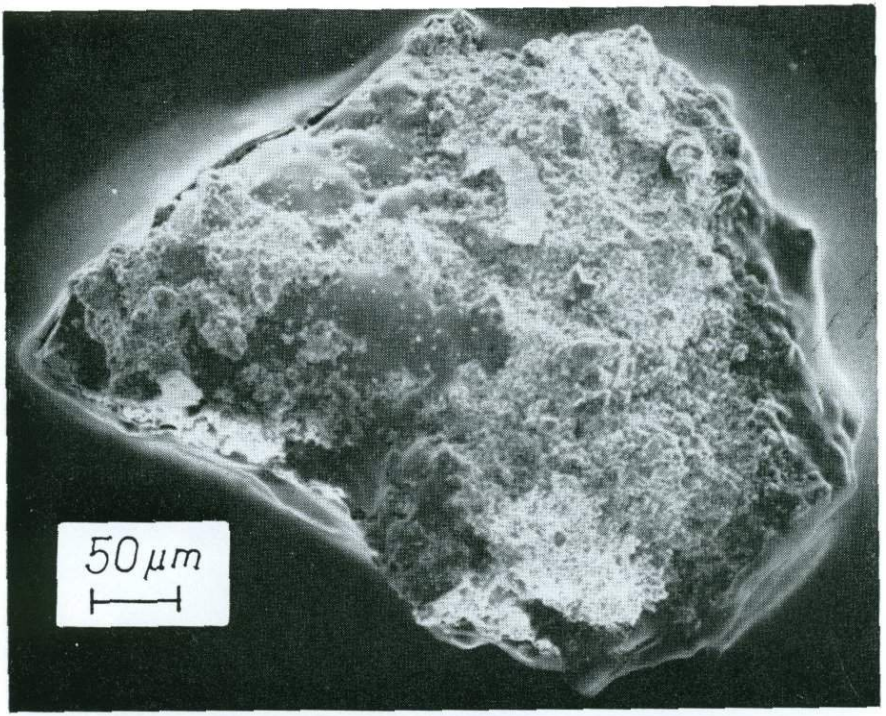

7 μm

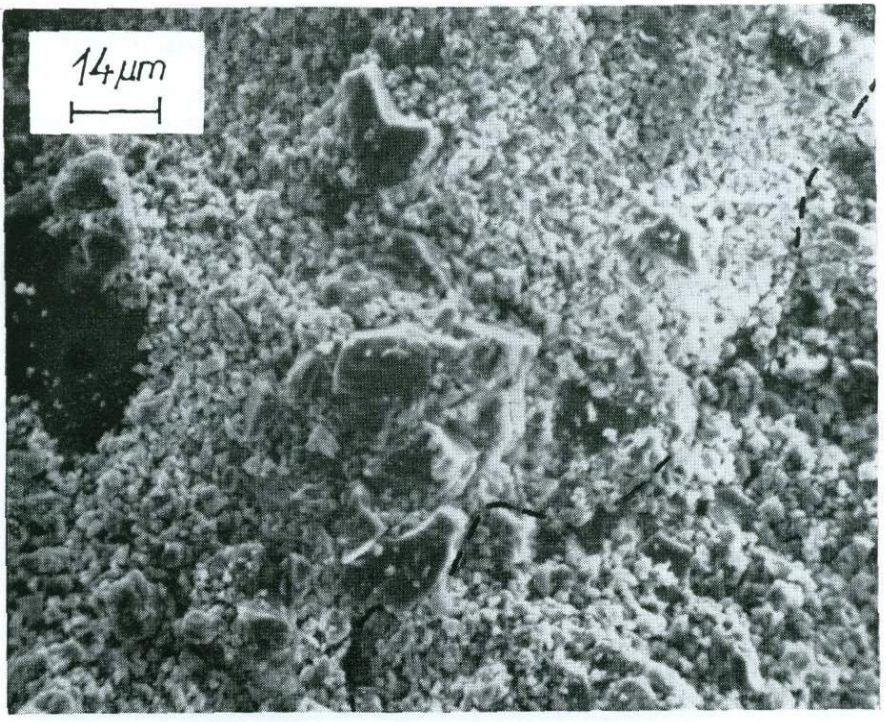
93. *Fragment of regolith breccia composed of two different types of material; the larger* left part is formed of mare material and the right-hand portion of light-colored highland material. (The differences have been determined under a binocular microscope and are sufficiently distinct even on the fig.). The part consisting of mare material is characterized by higher strength, reflected in more angular outlines, and by a strikingly larger glass portion. Luna 16.

93. Общий вид фрагмента реголитовой брекчии, сложенной двумя различными типами материала. Левая большая часть фрагмента состоит из материала морского типа, правая сложена более светлым (при визуальном наблюдении) материковым веществом. Граница между обеими частями достаточно четкая. *Участок, сложенный морским материалом, характеризуется несколько большей* плотностью, что отражается в большей угловатости очертаний этой части фрагмента, и заметно большим содержанием стекла. „Луна-16".

94. Enlarged view of the central part of Fig. 93, demonstrating the contact between mare and highland breccia types. Luna 16.

94. Увеличенное изображение центральной части рис. 93, иллюстрирующее характер контакта между морским и материковым материалом брекчии. „Луна-16".


50 μm

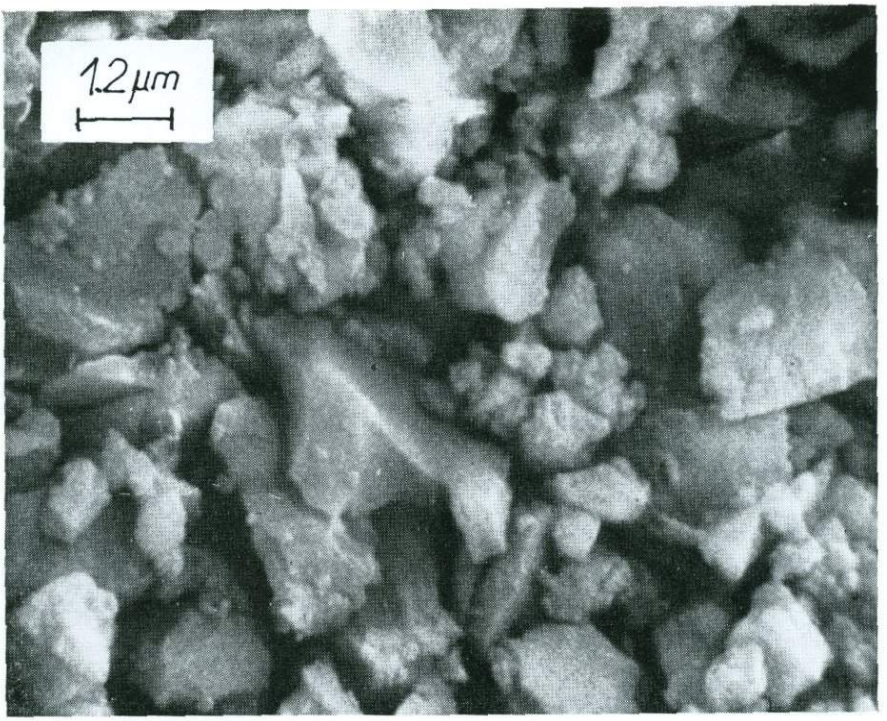

14 μm

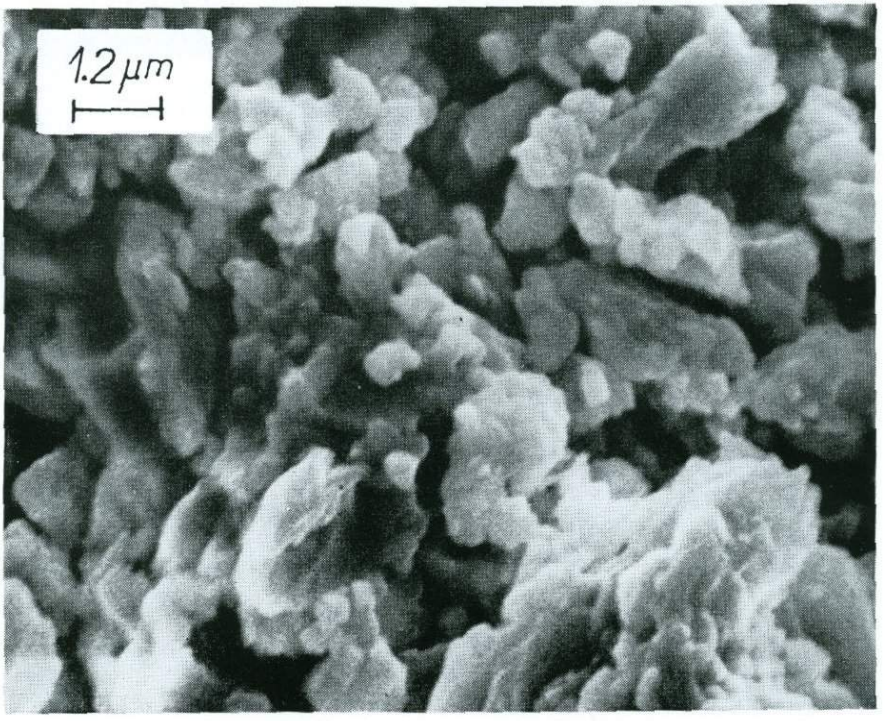
95. Enlarged left portion of Fig. 93. Characteristic of the mare material of breccia are isometric forms of individual fragments. Luna 16.

95. Увеличенное изображение левой части рис. 93. Морской материал брекчии характеризуется в целом изометричностью форм слагающих его зерен. „Луна-16".

96. Enlarged right-hand portion of Fig. 93. Distinctive of the highland material of breccia is the flattened form of grains caused by plagioclase cleavage. Luna 16.

96. Увеличенное изображение правой части рис. 93. Материковому материалу брекчии более свойственна уплощенная форма зерен, обусловленная, очевидно, спайностью плагиоклазов. „Луна-16".


1.2μm

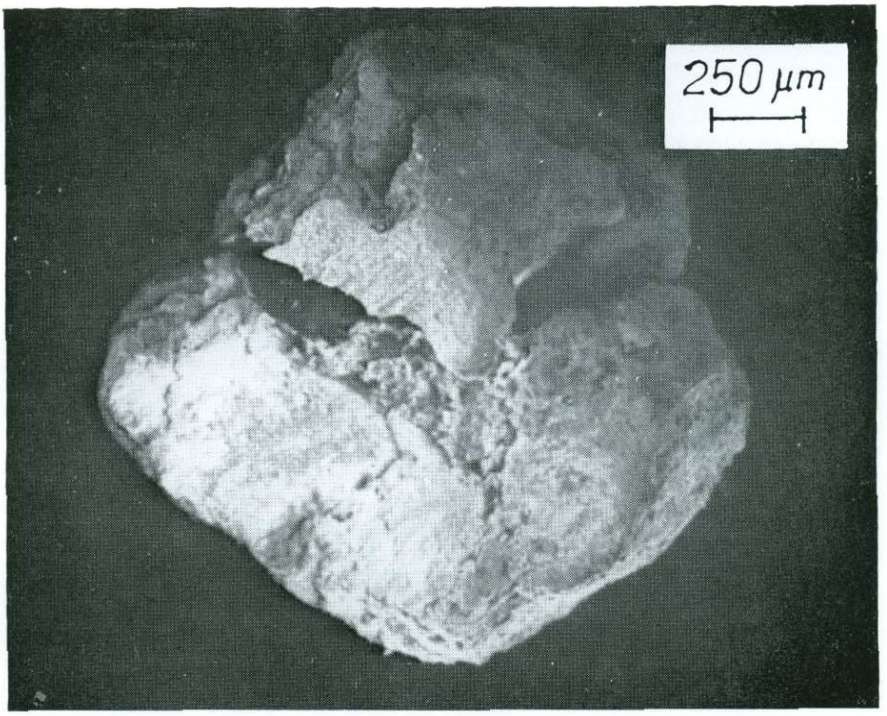

1.2μm

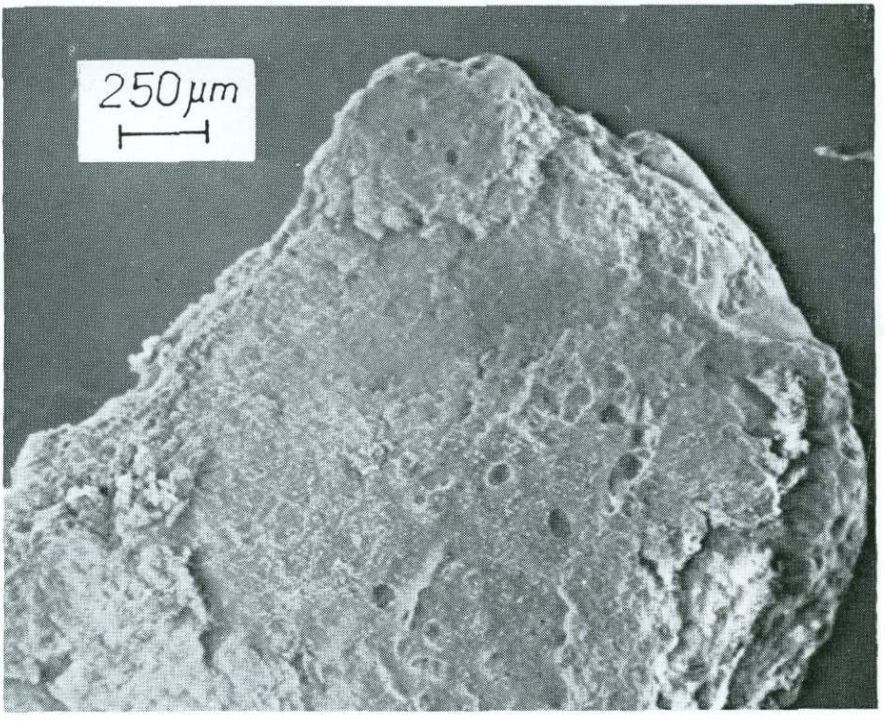
97. Regolith breccia composed of highland material has smooth, rounded forms and is intersected by a network of small and larger cracks. Luna 20.

97. Общий вид фрагмента реголитовой брекчии, сложенной материковым материалом. Частица отличается сглаженными очертаниями и наличием сети крупных и мелких трещин, разбивающих все тело фрагмента. „Луна-20".

98. Part of a regolith breccia fragment showing a relatively even surface. A silicate splash is seen at the top of the fragment and a group of crater-like forms in its central part. Luna 16.

98. Участок обломка реголитовой брекчии, поверхность которого в целом достаточно ровная. На верхней части фрагмента выделяется набрызг силикатного расплава. В центре снимка — группа мелких кратероподобных образований. „Луна-16".


250 μm

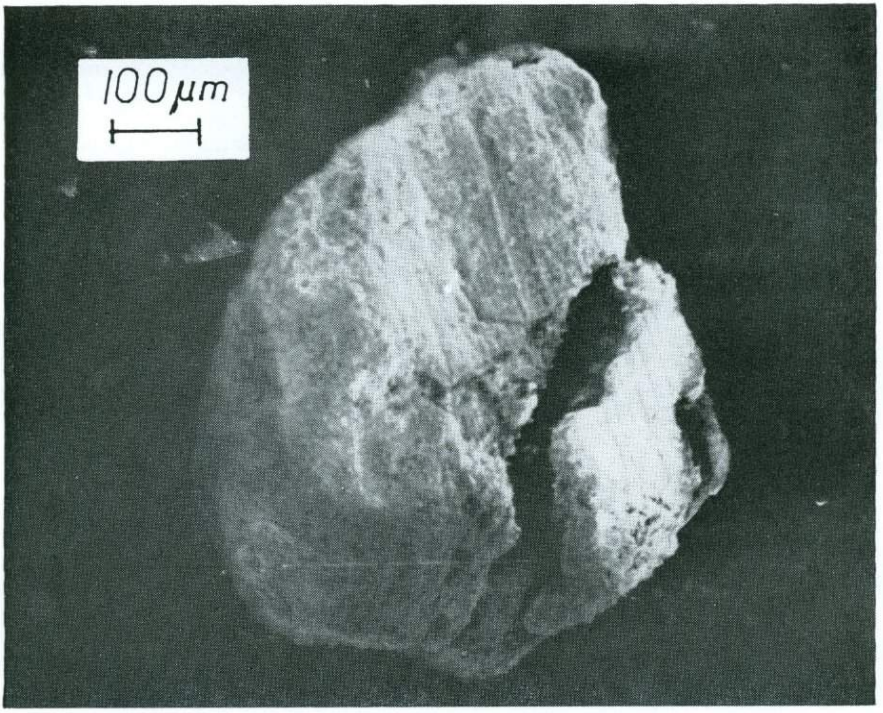

250 μm

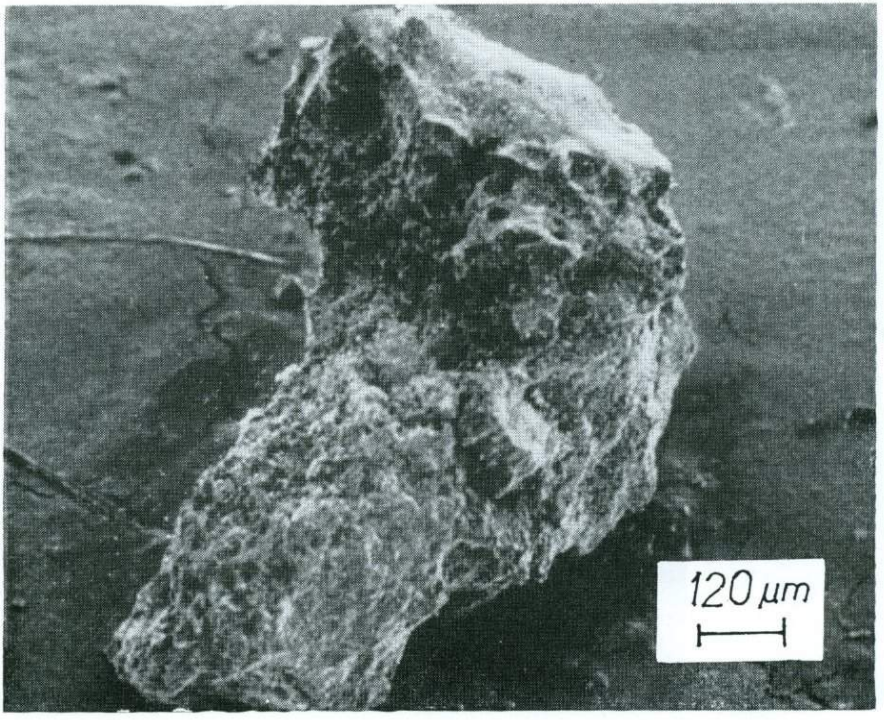
99. A rounded fragment of regolith breccia, whose smooth surface shows fine linear striation resembling slickensides known from terrestrial rocks of fault zones. The fragment is cut by a deep crack into two parts. Luna 16.

99. Фрагмент реголитовой брекчии мягкой, сглаженной формы, разбитый глубокой трещиной. Особенностью фрагмента является наличие на ровной поверхности тонкой параллельной штриховки, напоминающей зеркала скольжения на земных породах в зоне сдвига. „Луна-16".

100. An irregularly shaped fragment of regolith breccia with a complex surface and features suggestive of partial melting (on top). Luna 16.

100. Обломок реголитовой брекчии неправильной формы со сложной поверхностью и со следами оплавления (на рисунке сверху). „Луна-16".


100 μm

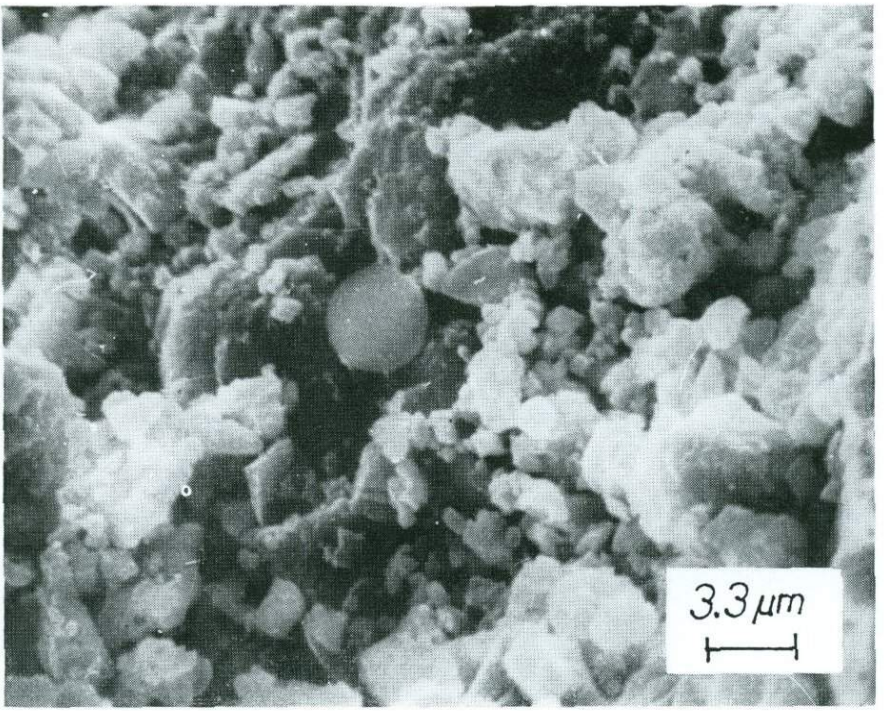

120 μm

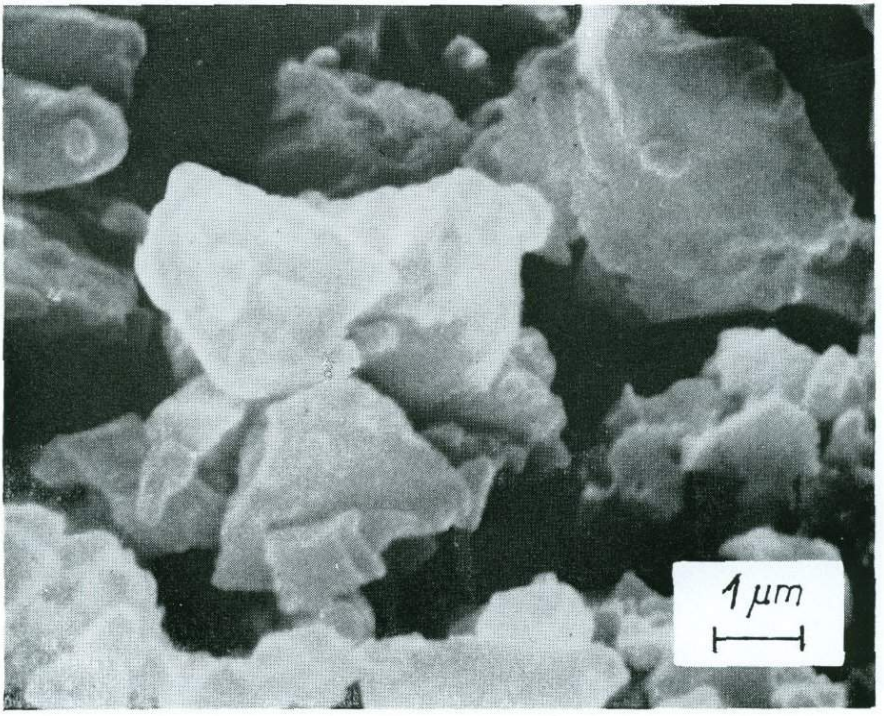
101. A fragment of regolith breccia showing diverse types of rock-forming particles (fragments of minerals and rocks, glassy particles and spherules) which correspond to the fine-grained regolith material. Luna 16.

101. Участок поверхности фрагмента реголитовой брекчии. Типы частиц, слагающих эту породу (зерна минералов и пород, стеклянные обломки и шарики), отвечают мелкозернистому материалу реголита. „Луна-16".

102. Surface of regolith breccia at high magnification. Note flattened shape of plagioclase grains and relatively weakly consolidated internal structure of the rock. Luna 20.

102. Участок поверхности реголитовой брекчии при большом увеличении. Характерной особенностью фрагмента является уплощенная форма зерен плагиоклазового состава и относительно рыхлое сложение. „Луна-20".


3.3 μm

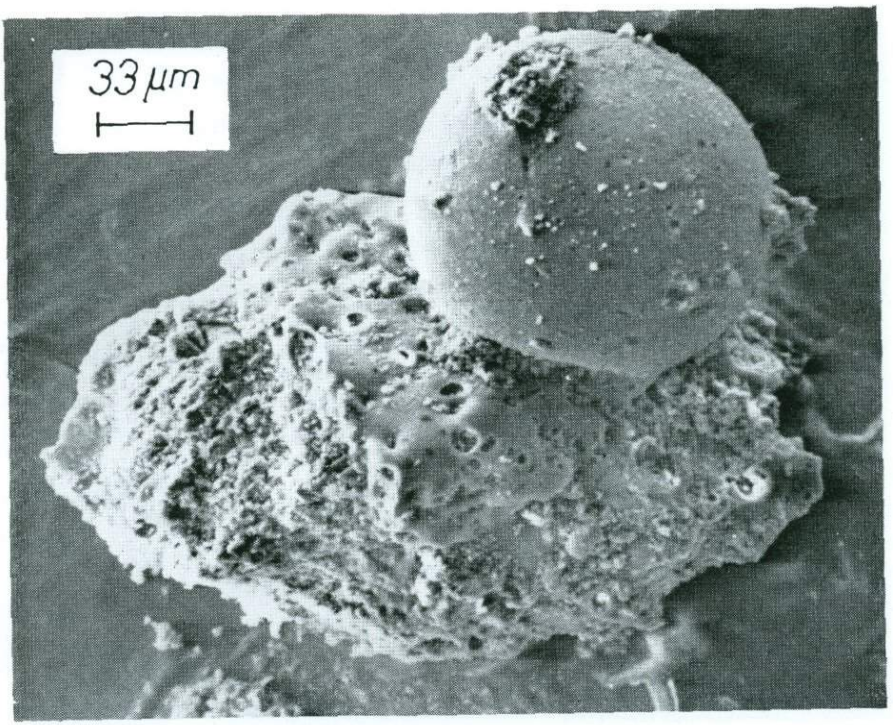

1 μm

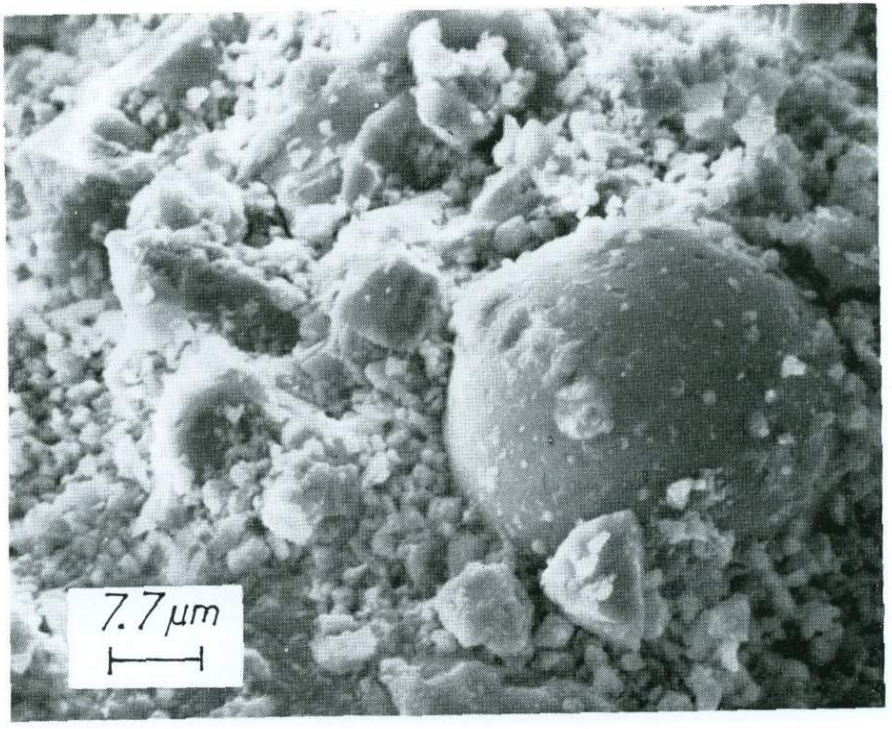
103. Silicate splash with an attached spherule on the surface of regolith breccia. Note relatively sharp contact between host breccia and silicate splash. Luna 20.

103. Набрызг силикатного расплава с прилипшим к нему шариком на поверхности реголитовой брекчии. Контакт между брекчией и набрызгом носит достаточно резкий характер. „Луна-20".

104. Part of breccia surface. Rock-forming particles derived from the fine-grained regolith fraction differ in type and dimensions. Luna 20.

104. Участок поверхности брекчии, сложенной частицами мелкозернистого материала реголита различного типа и широкого спектра размеров. „Луна-20".


33 μm


7.7 μm

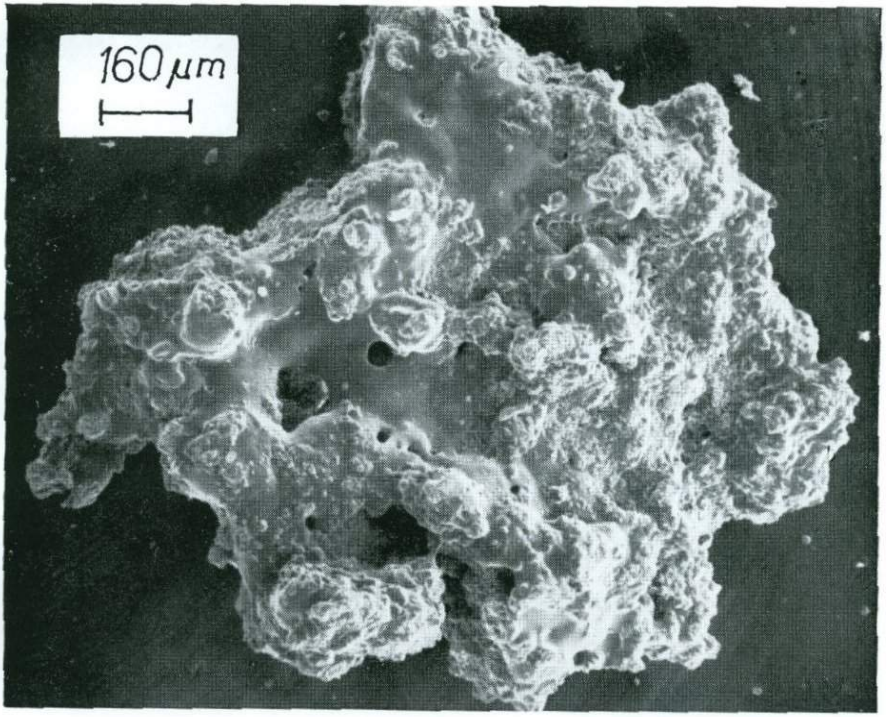
Agglutinates
Агглютинаты

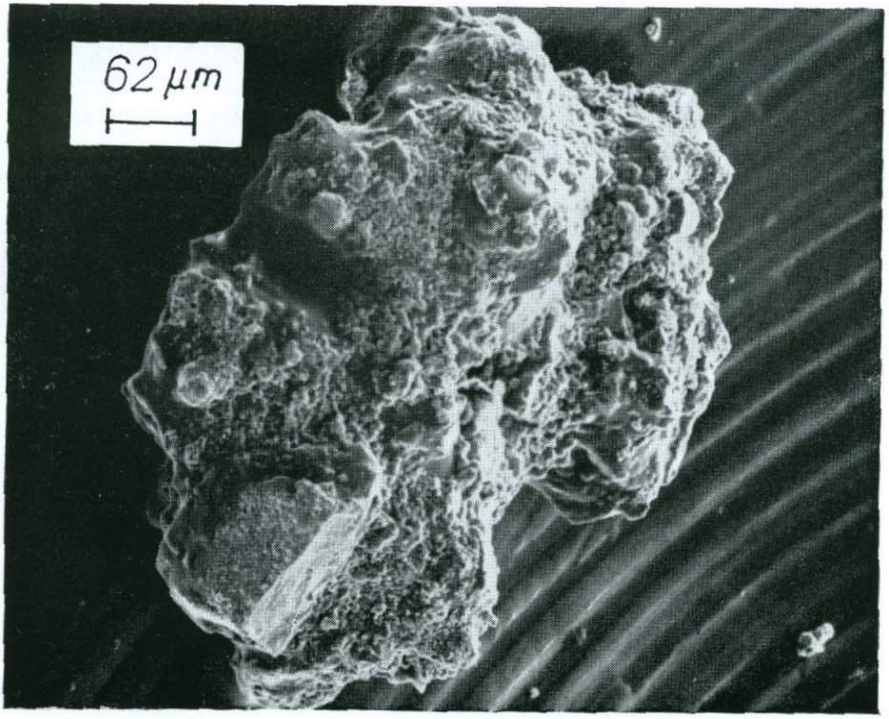
105. General view of a typical agglutinate with irregular shape, bizarre appearance and hummocky surface. The greater part of the particle is covered with porous glass. The shape and surface type of the particle are characteristic of agglutinates and are determined by its genesis. It consists of rock, mineral and glass fragments partially melted and welded together by high-velocity impact. Luna 16.

105. Общий вид частицы агглютината, характеризующейся правильной формой и причудливыми очертаниями. Поверхность частицы неровная, бугристая; большая ее часть покрыта пузырчатым стеклом. Характер формы и поверхности частицы обусловлены ее генезисом: оплавлением и спеканием литических фрагментов, минеральных и стеклянных зерен лунного реголита в одну частицу при высокоскоростном метеоритном ударе. Форма и поверхность представленной частицы являются весьма типичными для агглютинатов. „Луна-16".

106. Overview of an agglutinate formed of particles differing in shape and size, which are cemented by silicate melt. A large subhedral pyroxene grain is welded to the agglutinate surface on bottom left. Luna 20.

106. Общий вид частицы агглютината, представляющей собой агломерат частиц разнообразной формы и различного размера, связанных застывшим силикатным расплавом. Внизу слева резко выделяется большое гипидиоморфное свежее зерно пироксена, припекшееся к поверхности агглютината. „Луна-20".


160 µm

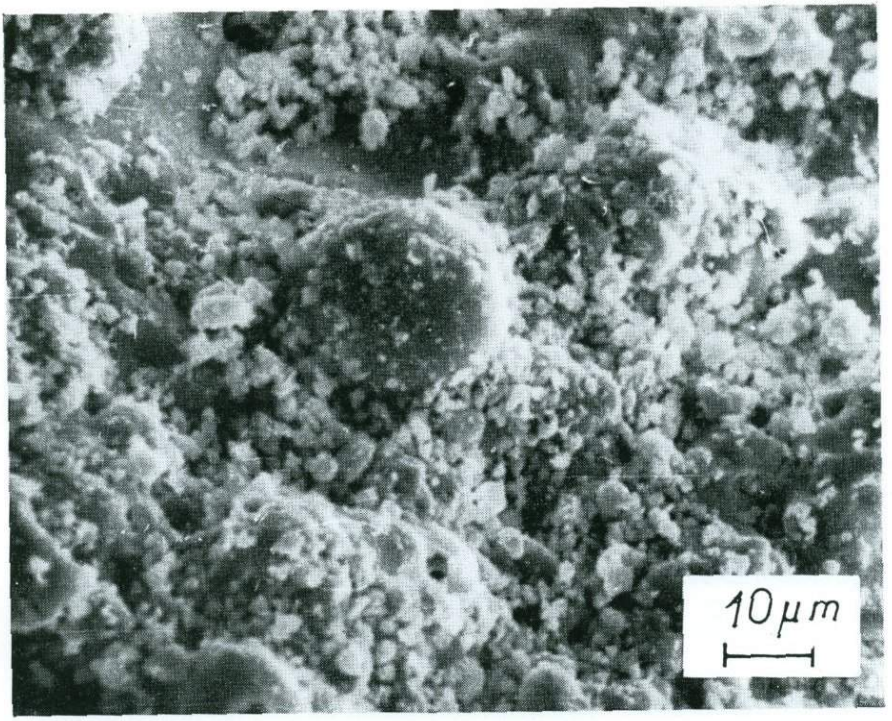

62 µm

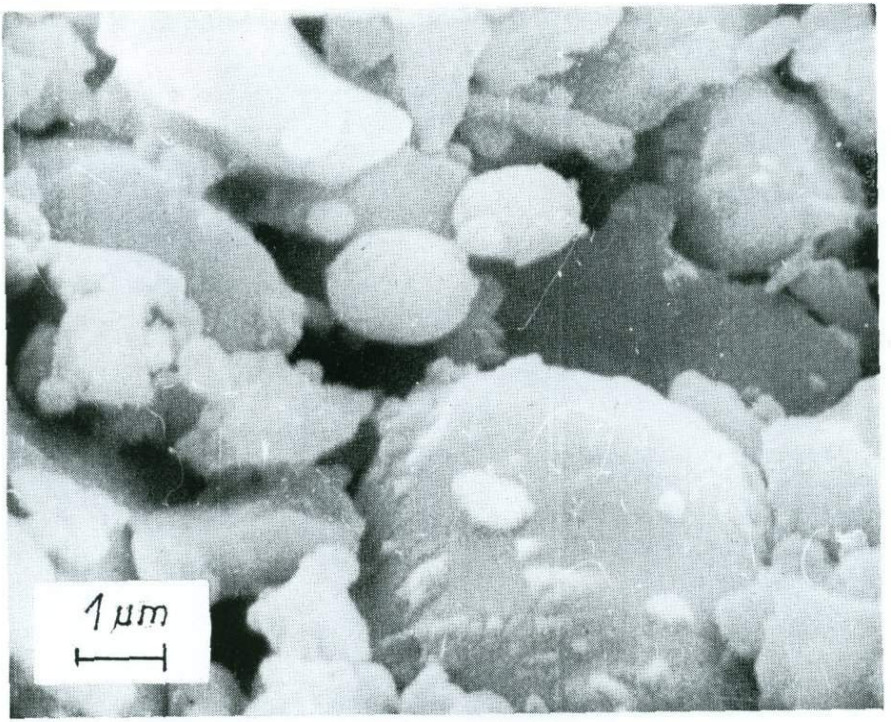
107. Part of agglutinate surface with characteristic rough hummocky relief. The role of glass as agglomerizing factor is obvious. Portions of glass alternate with aggregates of regolith fines welded together. Luna 16.

107. Участок поверхности агглютината, характеризующейся заметной шероховатостью. Следует отметить агломерируюшую роль стекла в образовании частицы. Участки стекла на ее поверхности чередуются с агрегатами спекшихся мелких зерен реголита. „Луна-16".

108. Enlarged detail of agglutinate in Fig. 107 showing weak cementation of grains and the variability of their forms and dimensions. Some grains are partly melted at their contacts (in the center). Luna 16.

108. Увеличенное изображение участка поверхности агглютината, показанного на рис. 107. Видна рыхлая упаковка и различные форма и размеры составляющих агглютинат зерен. В центре рисунка хорошо заметно локальное сплавление зерен в точке контакта. „Луна-16".


10 µm

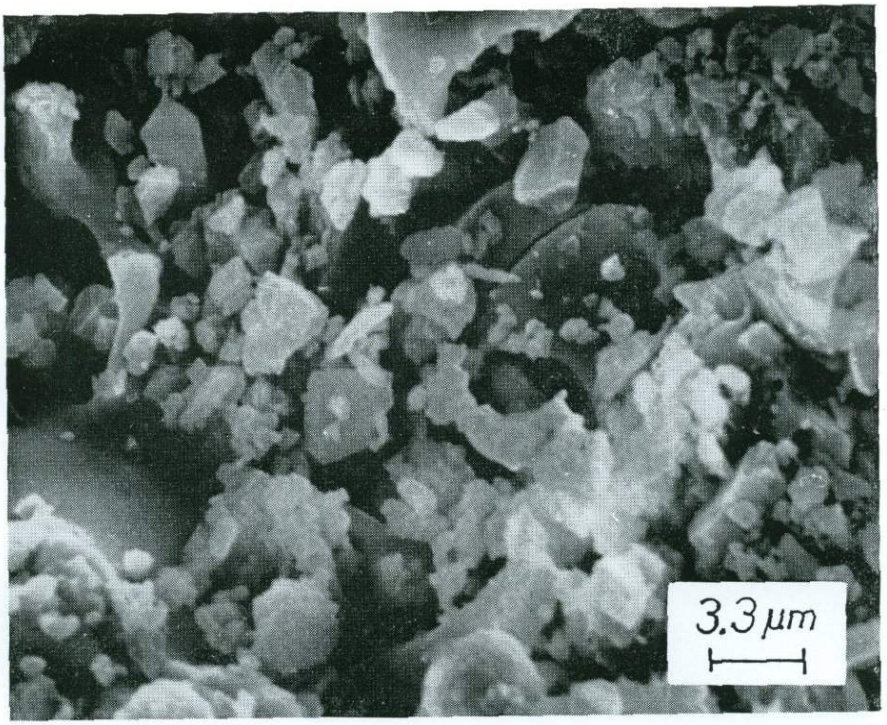

1 µm

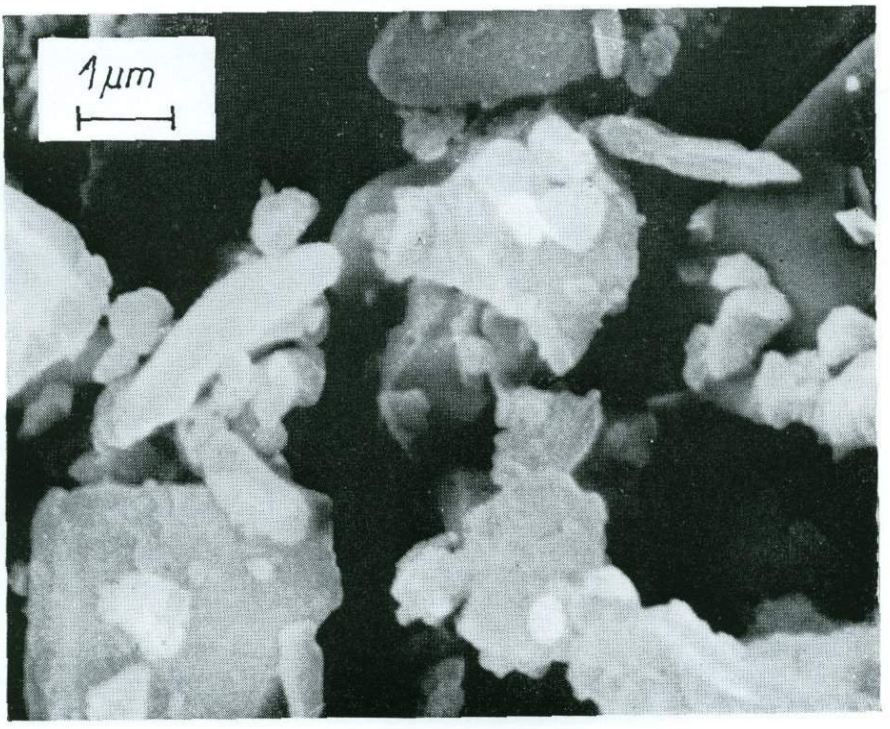
109. Character of surface structure of an agglutinate. Luna 16.

109. Характер поверхностной структуры агглютината. „Луна-16".

110. Enlarged detail of the central part of Fig. 109 showing the variability of forms and dimensions of individual grains of the agglutinate. Luna 16.

110. Увеличенное изображение центральной части рис. 109, демонстрирующее вариабильность формы и размера слагающих агглютинат зерен. „Луна-16".


3.3 μm

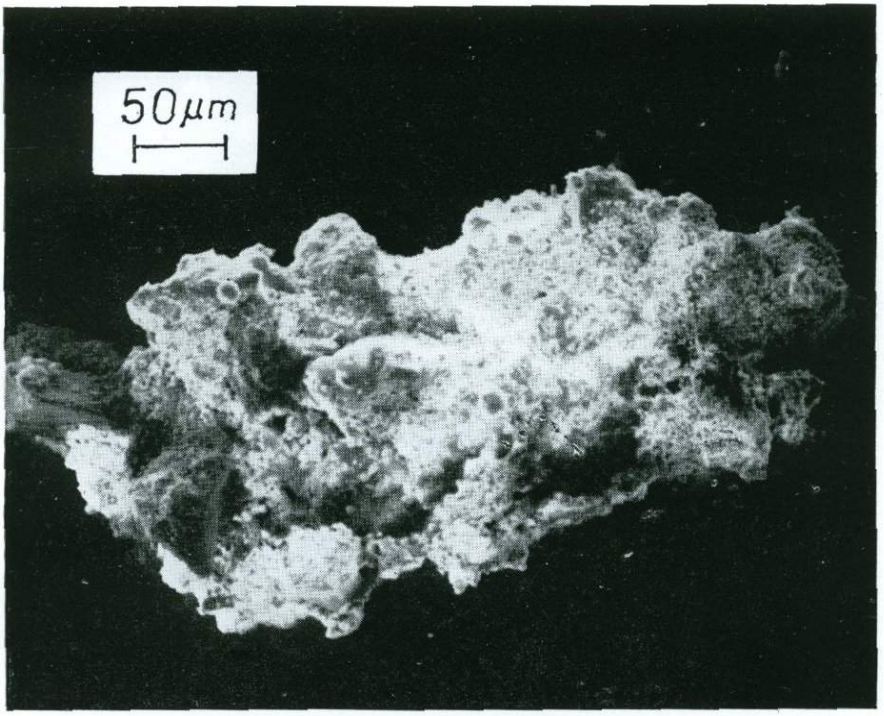

1 μm

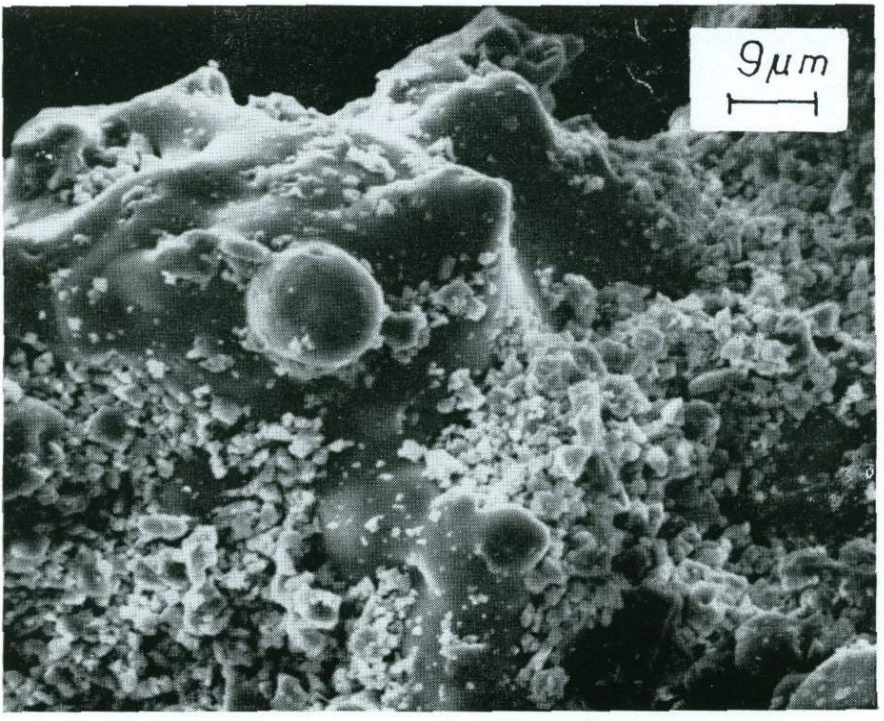
111. General view of an agglutinate characterized by irregular shape and hummocky surface. Luna 20.

111. Общий вид агглютината, отличающегося неправильной формой и бугорчатым рельефом поверхности. „Луна-20".

112. Enlarged upper left portion of the agglutinate shown in Fig. 111. The surface character of this highland agglutinate is similar to that of mare agglutinate illustrated in Fig. 105. Solidified silicate melt cementing the individual regolith particles forms the greater part of the figured portion. Fine regolith fragments were attached to the not yet completely cooled silicate melt. Luna 20.

112. Увеличенное изображение верхнего левого участка агглютината, показанного на рис. 111. Характер поверхности этой частицы из материкового реголита аналогичен таковому частицы из морского реголита (см. рис. 105). Большая часть демонстрируемого участка представляет собой застывший силикатный расплав, сцементировавший частицы реголита. На поверхности — мелкие зерна грунта, прилипшие к силикатному расплаву, когда он был еще в незастывшем состоянии. „Луна-20".


50μm

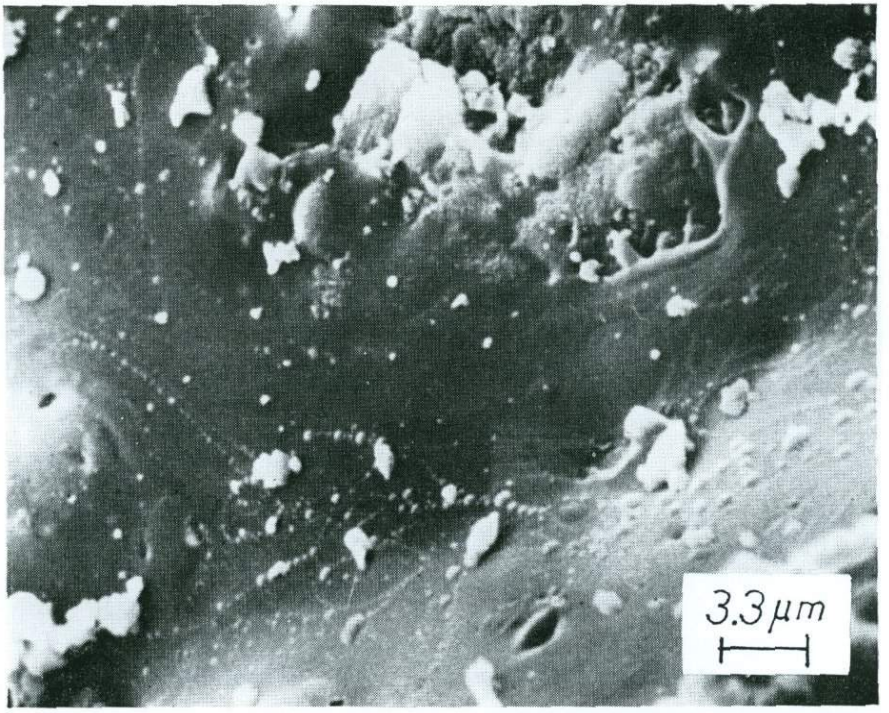

9μm

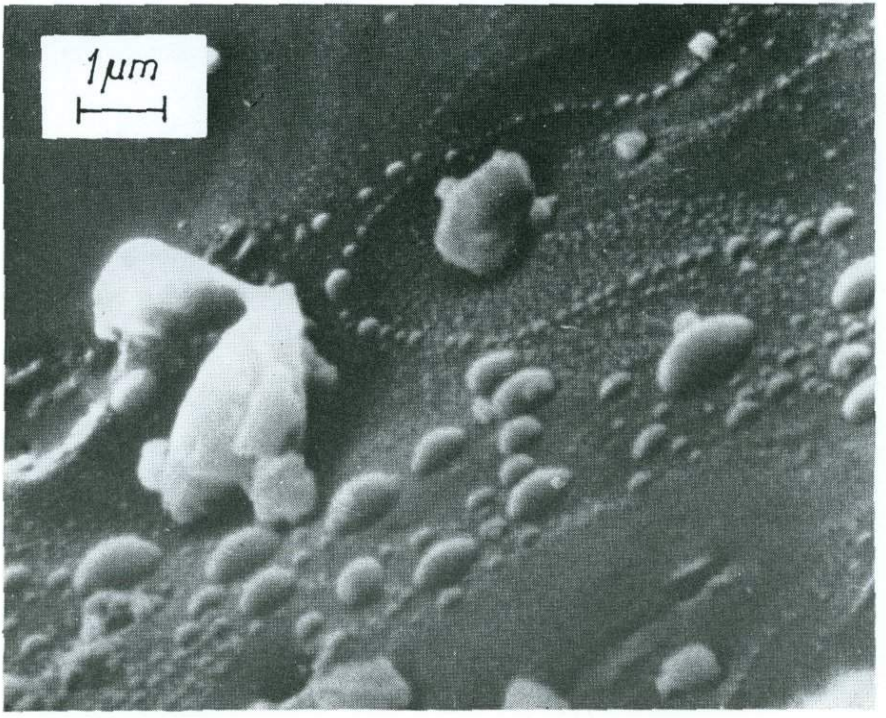
113. Hemispherical mounds, a characteristic feature of glassy agglutinate surfaces originated probably from the liquid phase. They are often arranged into chains or other patterns reflecting streamline flow of the liquid. Luna 16.

113. Характерный элемент стекловатых поверхностей агглютинатов — полусферические, каплеобразные бугорки, имеющие, по-видимому, ликвационное происхождение. Часто они образуют цепочки и узоры разнообразного вида, отражающие струйчатое движение вещества при ликвации. „Луна-16".

114. Enlarged detail of the right-center of Fig. 113. Hemispherical mounds are formed of FeS. Pores generated during degassing of the melt (on the bottom) and attached angular mineral fragments are seen on the glass surface. Luna 16.

114. Увеличенное изображение полусферических бугорков (центральный участок правой части рис. 113), химический состав которых отвечает FeS. Поверхность стекла осложнена также образовавшимися при дегазации расплава порами (нижняя часть рисунка) и прилипшими остроугольными зернами минералов. „Луна-16".


3.3 μm


1 μm

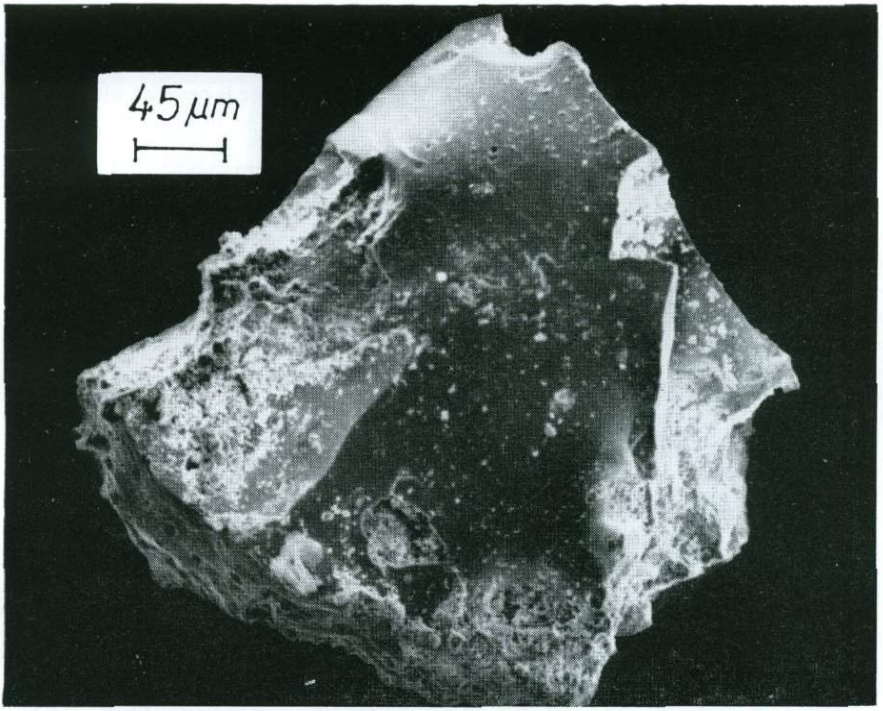
Glasses
Стекла

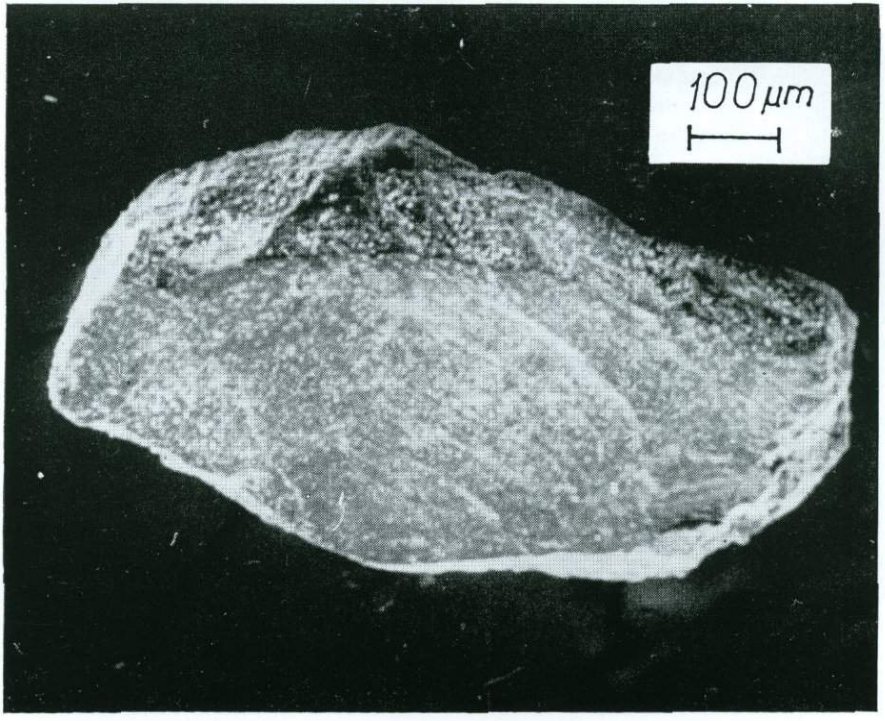
115. Glass fragment from mare regolith. Even and smooth surface of its central part is the result of uniform quiet cooling of the silicate melt. On the left and right there are chip and conchoidal fracture surfaces characteristic of glasses. Their origin was connected with brittle deformation of glass at low-velocity impacts. Luna 16.

115. Обломок стекла из морского реголита. Ровная и гладкая поверхность центральной части фрагмента образовалась в результате свободного затвердевания силикатного расплава. Рельеф левой и правой частей поверхности определяется в основном сколами с характерным для стекла раковистым изломом, образование которых связано с хрупкими деформациями стекла при низкоэнергетическом ударном воздействии. „Луна-16".

116. Glass fragment of elongated form and subrounded outline which is due to lunar erosion during its long exposure on the Moon's surface. The fragment shows characteristic conchoidal fracture. Luna 20.

116. Фрагмент стекла продолговатой формы с характерными раковистыми сколами. Сглаженные очертания частицы в целом связаны с процессом корразии при длительном пребывании частицы на лунной поверхности. „Луна-20".


45 µm

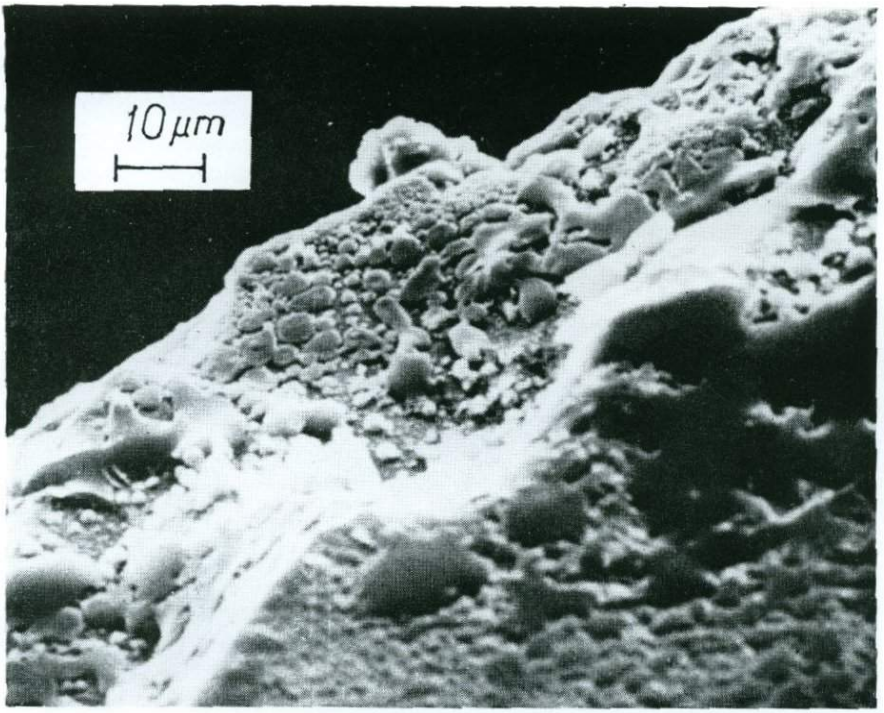

100 µm

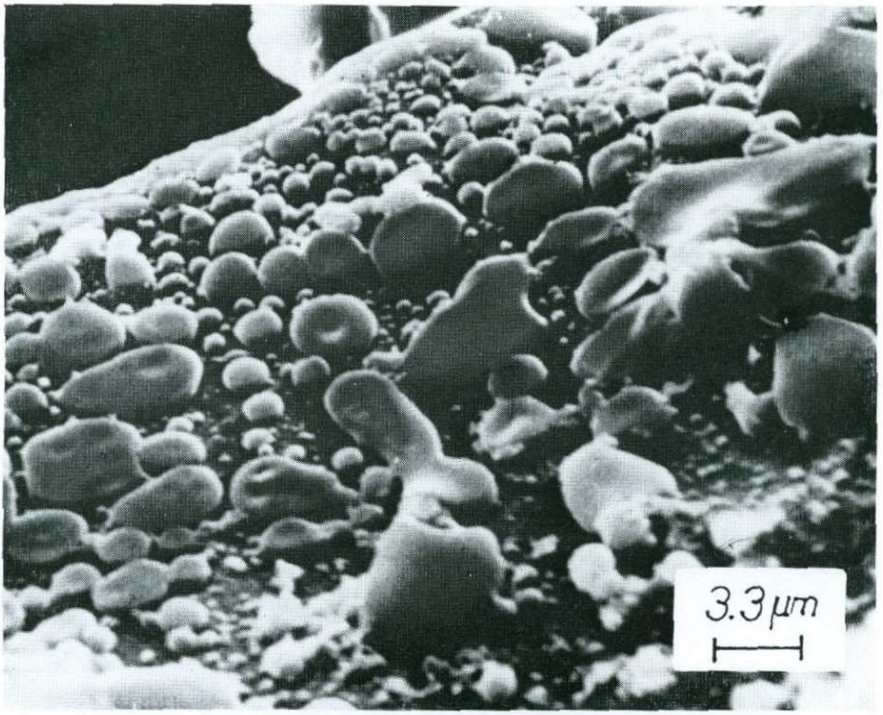
117. Enlarged upper left part of glass fragment shown in Fig. 116. In the center there is an impact depression whose morphology is not very distinct owing to intensive subsequent reworking of the particle. The fragment surface is covered with fine drop-like formations of silicate composition. Luna 20.

117. Увеличенное изображение левой верхней части фрагмента стекла, представленного на рис. 116. В центре снимка — ударная депрессия, морфология которой проявляется недостаточно четко в связи с интенсивной последующей переработкой поверхности частицы. Поверхность участка покрыта мелкими каплевдными образованиями силикатного состава. „Луна-20".

118. Enlarged central part of Fig. 117. Rounded drop-like formations (from several tenths μm to a few μm in diameter) on the glass surface have a hemispherical shape, which changes to ellipsoidal with the increase in size. The drops occasionally merge into larger formations of irregular shape (cf. on the right). Drop-like form of the mounds indicates a relatively high viscosity of silicate melt. The absence of outgassing structures on the surface is characteristic of the mounds. The larger mounds (>2—3 μm) bear shallow dimples, whose formation is very likely associated with the reduction of the volume of silicate matter during cooling and solidification of drop-like mounds. These are of basaltic chemistry with increased Fe content relative to host glassy fragment. They presumably originated when a cooling silicate melt impacting a host glassy fragment had not a high enough temperature to flow down the glass surface and dispersed into fine droplets, a few μm in size. Luna 20.

118. Увеличенное изображение центральной части рис. 117. Каплевидные образования (размером от десятых долей микрона до нескольких микронов) на поверхности стекла имеют полусферическую форму, которая с увеличением размера переходит в эллипсоидальную. Иногда отмечается слияние нескольких образований, что приводит к появлению более крупных форм с неправильными очертаниями (на рисунке справа). Характерной особенностью каплевидных образований является слабое смачивание ими подложки и полное отсутствие в них пористости. На поверхности каплевидных образований размером более 2—3 мкм наблюдаются неглубокие просадочные лунки. Их общие очертания повторяют форму самого образования. Возникновение лунок связано, вероятно, с уменьшением объема вещества при охлаждении и затвердевании рассматриваемых образований. Каплевидные образования по химическому составу соответствуют веществу базальтового типа, отличаясь от состава стеклянной частицы повышенным содержанием железа. Их образование, вероятно, можно объяснить падением крупной капли уже застывающего силикатного расплава на поверхность стекла. Температура расплава была такова, что капля не смогла смочить поверхность стекла, а разбилась на мелкие капельки микронного и субмикронного размера. „Луна-20".


10 μm

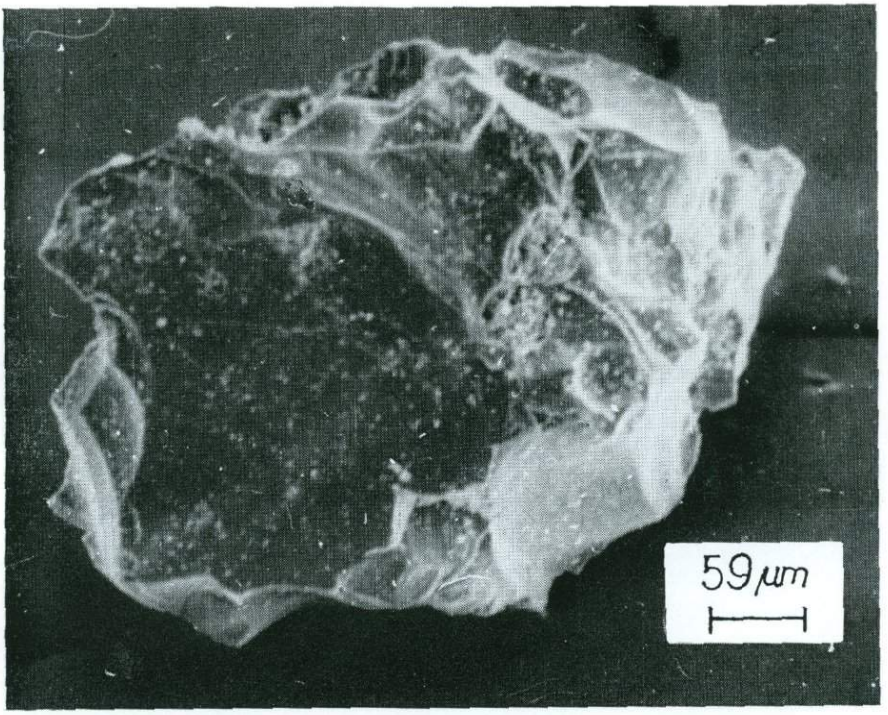

3.3 μm

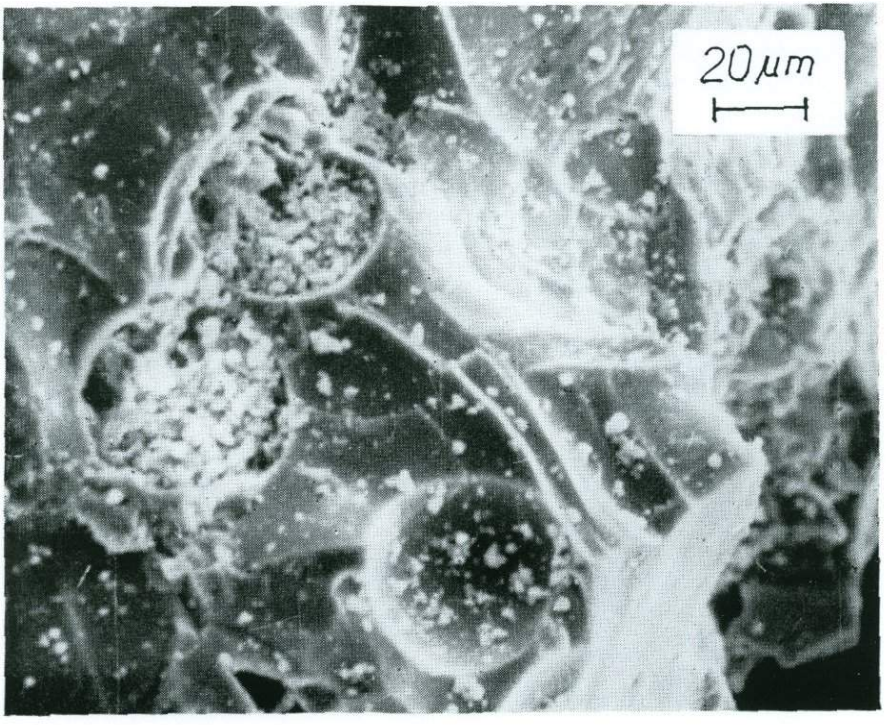
119. A glass fragment with conchoidal fracture surfaces. The angular outline and fresh fracture surfaces suggest that the fragment was exposed on the lunar surface for a short time. Luna 16.

119. Общий вид фрагмента стекла, поверхность которого в основном определяется многочисленными раковистыми сколами. Угловатые очертания фрагмента и свежий характер сколов указывают на малую длительность его пребывания на лунной поверхности. „Луна-16".

120. Enlarged right-hand portion of Fig. 119. Three rounded dimples are relics of gas-filled cavities which occur in the center. The cavities were within the particle body and were exposed by breaking the particle. The dimples are partly filled with regolith dust. The triangular cavity on the lower left may have formed as a result of the breaking through of the upper thin skin of the gas inclusion. Luna 16.

120. Увеличенное изображение правой части фрагмента, показанного на рис. 119. В центре снимка — три округлые ямки, представляющие собой остатки газовых полостей, находившихся в теле частицы и вскрытых затем при ее раскалывании. Ямки частично заполнены мелкими зернами реголита. В нижней части снимка — пора треугольной формы, образовавшаяся, возможно, в результате проламывания верхней стенки газовой полости. „Луна-16".


59 μm

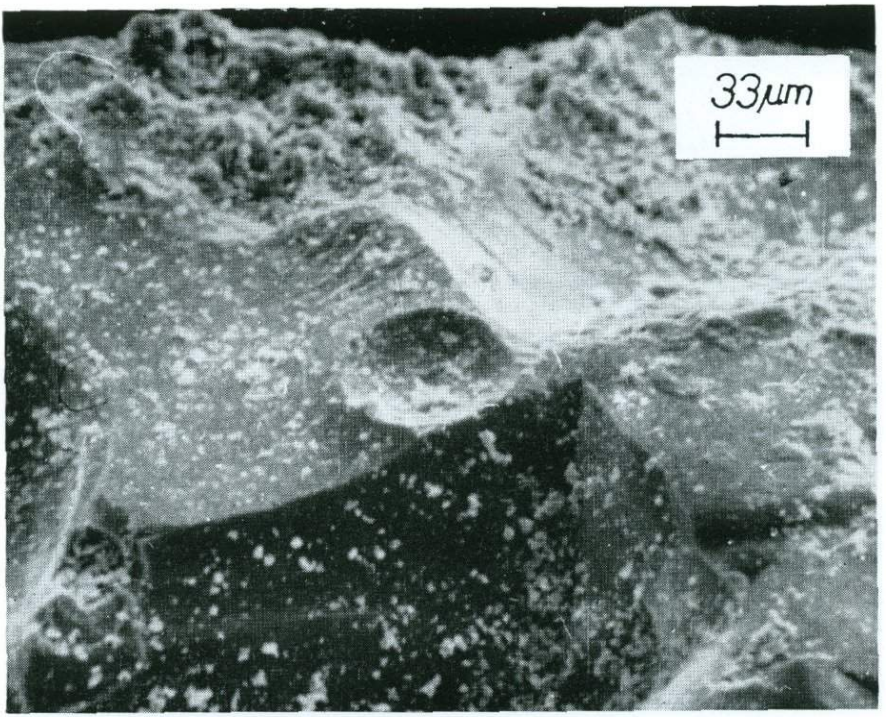

20 μm

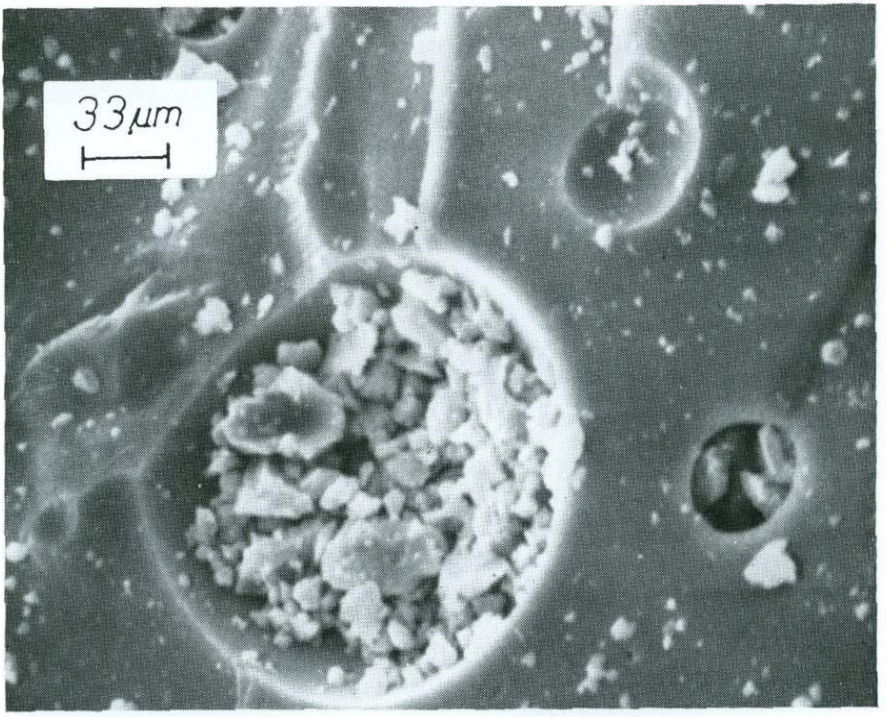
121. Glass fragment from mare regolith with well marked conchoidal character of chip surfaces, typical of glasses, and crater-like forms in the upper part. The depression in the center is a cavity after escaped gas. An interesting feature is its prominent pseudorim, which was probably produced by the high pressure of enclosed gas. This may have affected the morphology of the fracture surface around the cavity. Luna 16.

121. Участок поверхности частицы стекла из морского реголита. Отчетливо выражен раковистый характер сколов, типичных для стекол. В верхней части поверхность осложнена кратероподобными формами. В центре — депрессия, представляющая собой вскрытую газовую полость. Интересно отметить, что депрессия окружена четким псевдовалом, образование которого может быть связано с высоким давлением газа внутри полости, что повлияло на морфологию поверхности скола вокруг полости. „Луна-16".

122. Glass fragment from highland regolith. Abundant depressions of regular rounded shape and variable size are characteristic surface features. The depressions represent cavities after enclosed gases which occurred at different levels of the host glass. Luna 20.

122. Участок поверхности фрагмента стекла из материкового реголита. Основным элементом рельефа участка являются многочисленные округлые депрессии правильной формы различного размера, представляющие собой вскрытые на разных уровнях газовые полости. „Луна-20".


33μm


33μm

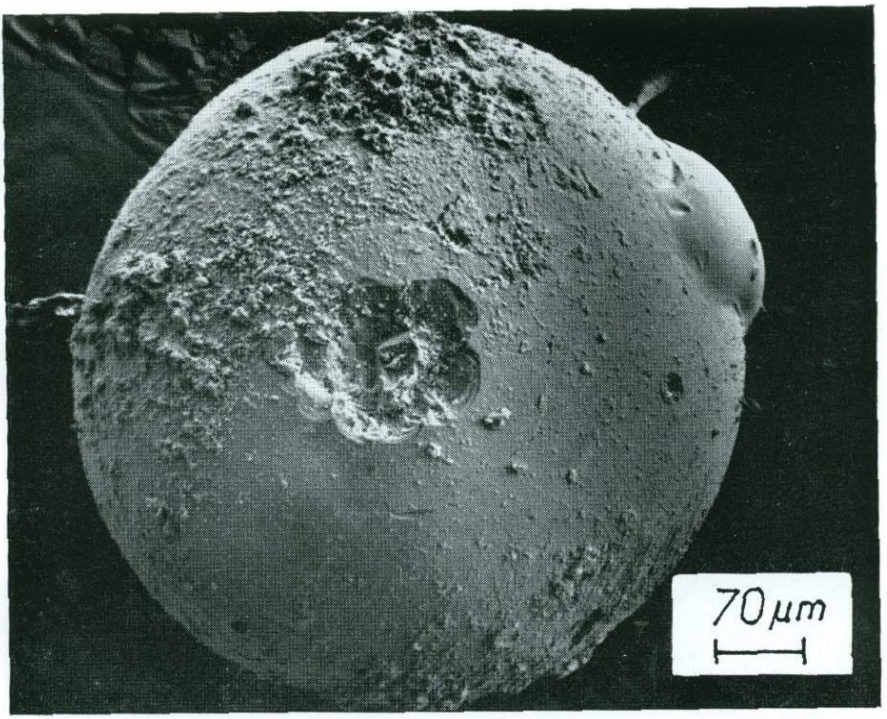
Glassy spheroidal particles
Стеклянные сферические частицы

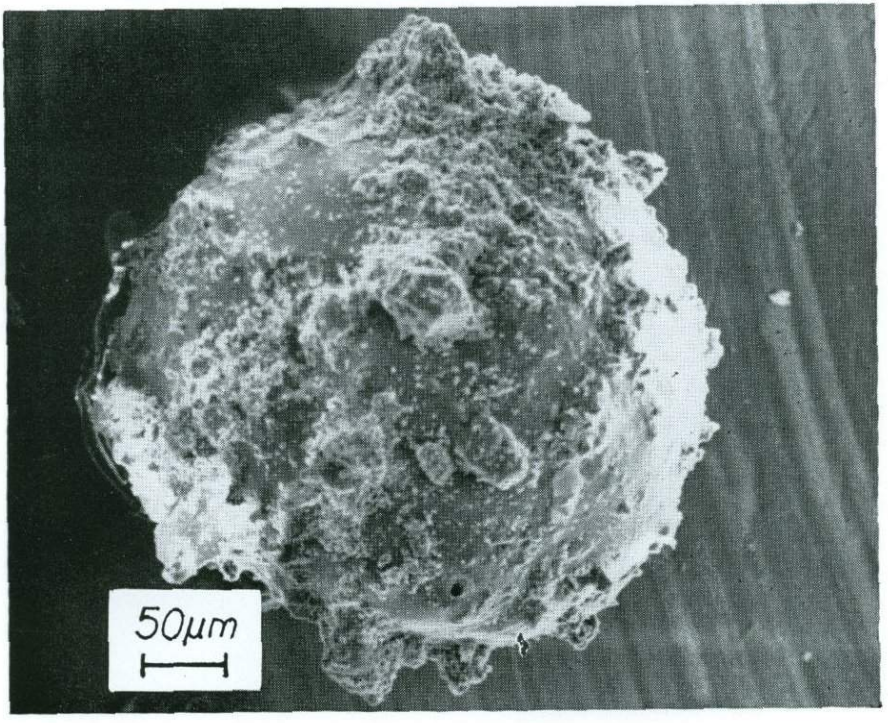
123. Overview of a glassy spheroidal particle. A well defined impact crater is seen in the center; above and to the right of it are impact craters of smaller dimensions. On the right a rounded mound on the periphery may have been formed by expanding gas inclusion in the interior of a still plastic sphere. Fragments of lunar regolith are cumulated at some parts of the particle surface. Luna 16.

123. Общий вид стеклянной сферической частицы. В центре частицы хорошо выраженный ударный кратер, сверху и справа от которого — более мелкие ударные кратеры. Справа на поверхности частицы рельефно выступает округлой формы бугорок — невскрывшийся газовый пузырек, образовавшийся, вероятно, в еще пластичной сферуле при экспансии газа из тела частицы. Для поверхности частицы характерно большое количество прилипших обломков лунных пород, часто образующих скопления. „Луна-16".

124. Glassy spheroidal particle. Highly diversified surface resulted from welding of fine regolith dust to a still sufficiently hot host particle. Luna 16.

124. Стеклянная сферическая частица с очень сложной поверхностью, образовавшейся в результате спекания частиц реголита с поверхностью сферической частицы, когда она была еще достаточно горячей. „Луна-16".


70μm

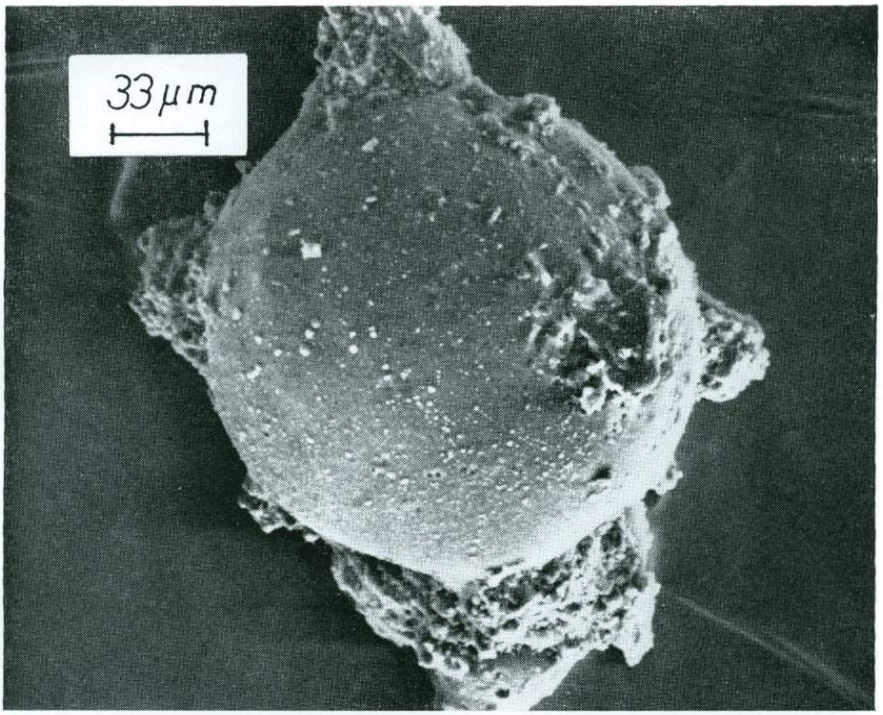

50μm

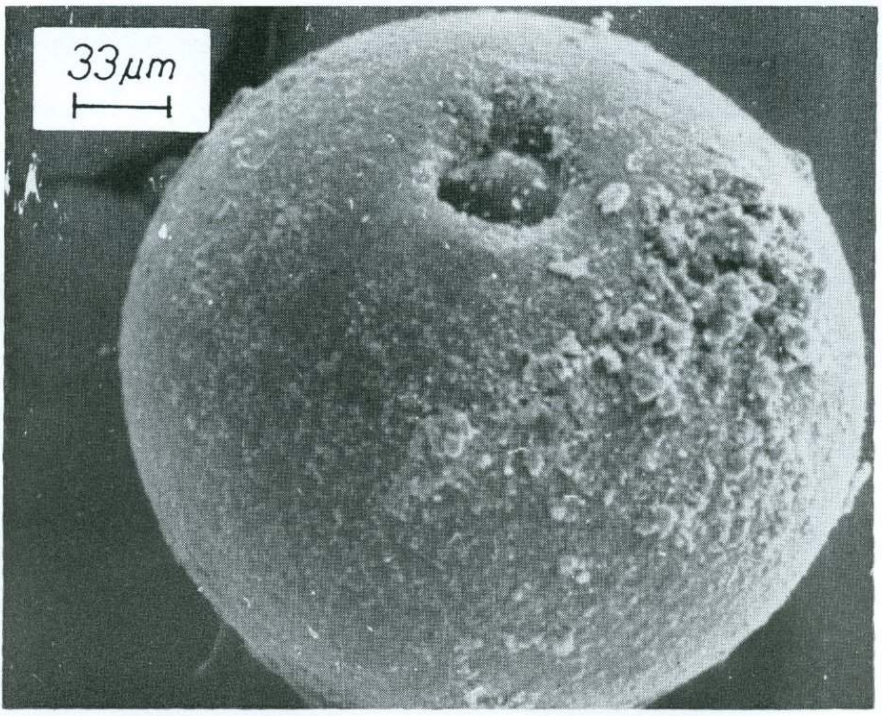
125. Glassy particle of a regular spherical shape with abundant fine regolith grains partially scorified, welded together and adhering to the host. Luna 20.

125. Стеклянная частица правильной сферической формы с прилипшими частично ошлакованными массами спекшихся мелких зерен реголита. „Луна-20".

126. Glassy particle of regular spherical shape. Part of the relatively smooth and fresh surface (on the right) is covered with agglomeration of scorified regolith particles. Rounded depression in the upper part is described in more detail below (see Fig. 138). Luna 16.

126. Стеклянная частица правильной сферической формы. На фоне относительно чистой и свежей поверхности выделяются (справа) участки, покрытые агрломератами мелких спекшихся частиц реголита. В верхней части рисунка — округлая депрессия, описание которой приводится ниже (см. рис. 138). „Луна-16".


33μm

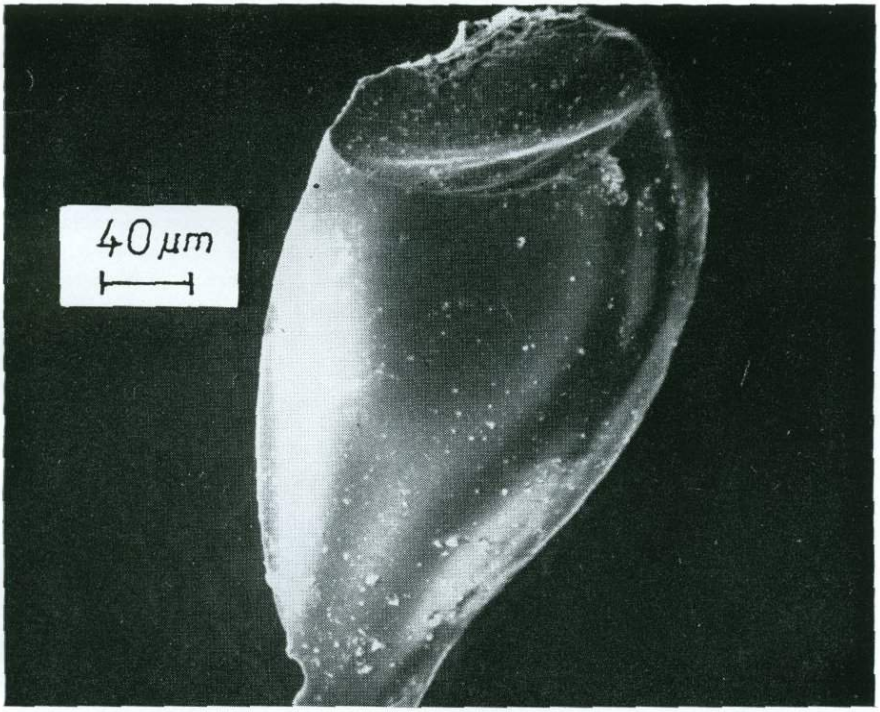

33μm

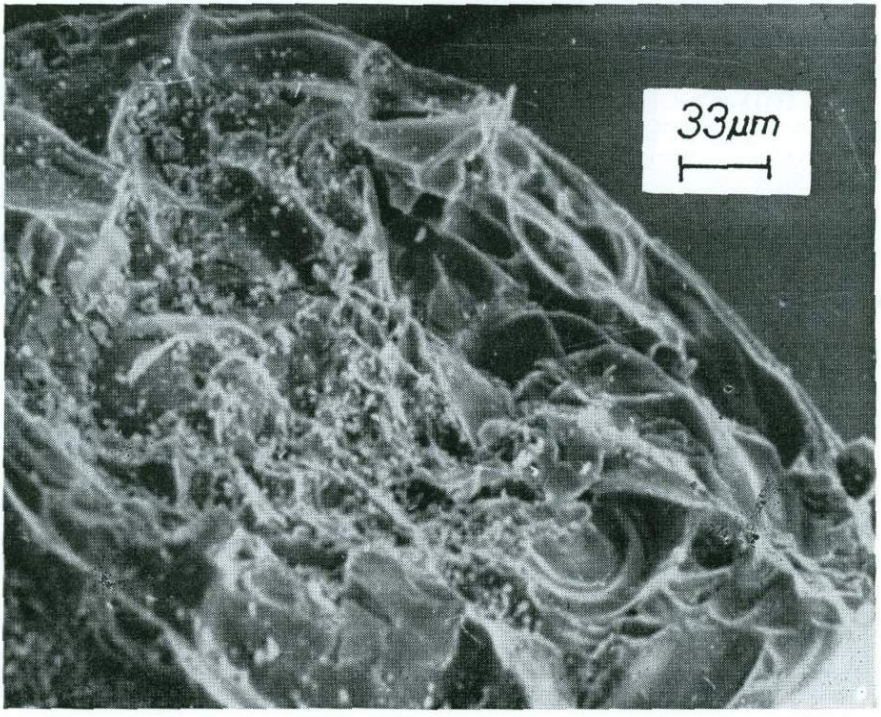
127. Drop-like glassy particle with smooth, very fresh surface. Its shape and deformations (accretions and wrinkles at the top and bottom) indicate that the still plastic particle effected rotary motion about its longer axis when in flight. An impact-produced deformation with typical conchoidal fracture is seen at the top. Luna 20.

127. Стеклянная частица каплевидной формы с гладкой, свежей поверхностью. Форма частицы, а также видимая некоторая деформация ее вещества (в виде наплывов, складок, на снимке внизу и наверху) указывают на то, что частица в полете, будучи еще в пластичном состаянии, испытывала вращательные движения по большой оси. Наверху — ударный дефект с типичным раковистым изломом. „Луна-20".

128. A chip surface of glassy spheroidal particle produced by a low-velocity impact. The surface is uneven with many conchoidal structures. Traces of melting are not visible. Luna 16.

128. Образованный низкоскоростным ударом скол стеклянной сферической частицы с неровной поверхностью, характеризующейся отчетливо выраженным раковистым изломом и отсутствием видимых следов оплавления. „Луна-16".


40 μm

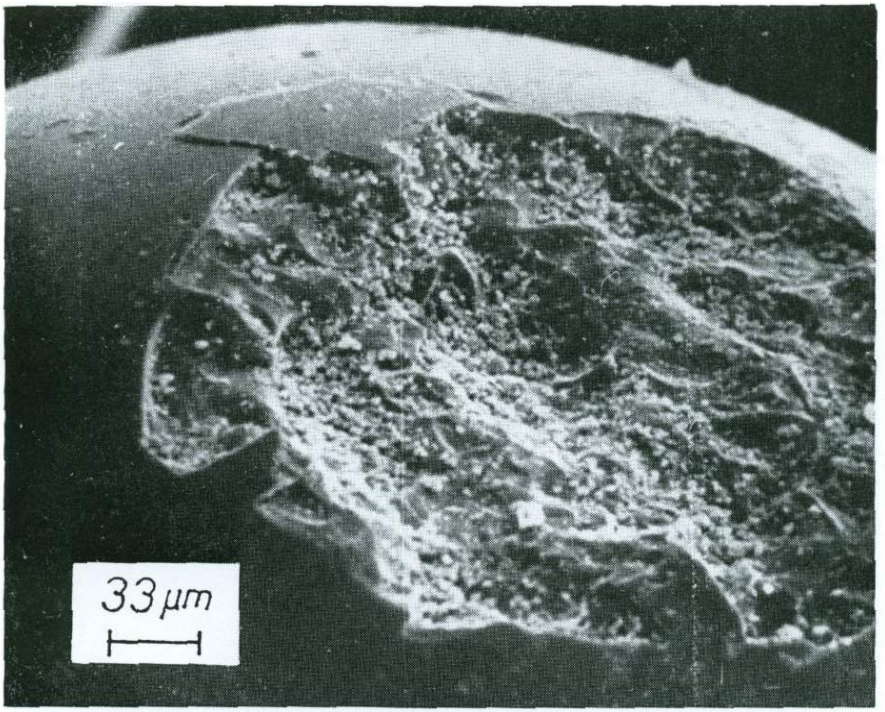

33μm

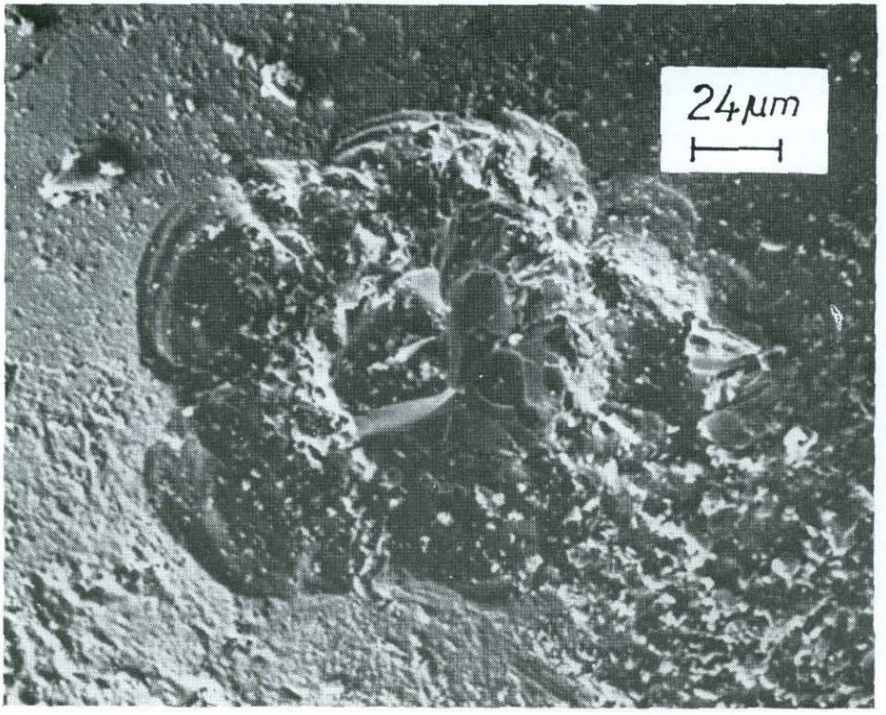
129. Low-velocity impact crater on the surface of a glassy spherule. The conspicuous central pit is separated from the spall zone by a more or less well developed rim. The surface of the whole deformed zone shows typical conchoidal fracture. On the top left spalling fractures originated at the formation of the crater are visible. The crater surface does not show traces of melting. Luna 16.

129. Кратер на поверхности стеклянного шарика, образованный низкоскоростным ударом. В центре кратера хорошо заметна лунка, которая отделена от зоны откола небольшим, не везде четко выраженным валом. Поверхность всей зоны разрушения характеризуется типичным раковистым изломом. Сверху слева отчетливо заметны трещины отслаивания, возникшие при образовании кратера. Поверхность кратера не несет видимых следов оплавления. „Луна-16".

130. Enlarged central part of Fig. 123 illustrates impact crater with well developed morphological features: pit, rim and spall zone. The spall zone consists of conchoidal petals-resembling forms, which join the rim. Both rim and spall zone are partly melted. Luna 16.

130. Увеличенное изображение центральной части рис. 123 — ударного кратера с хорошо выраженными морфологическими элементами: воронкой, валом и зоной откола, сложенной серией крупных раковин, в виде лепестков примыкающих к валу. Вал и зона откола частично оплавлены. „Луна-16".


33 μm

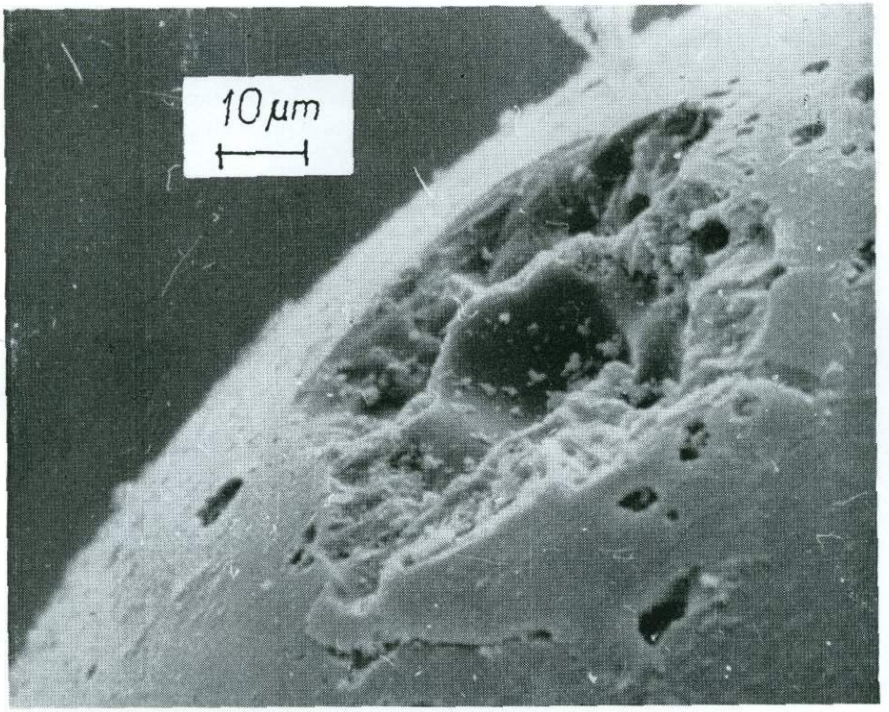

24 μm

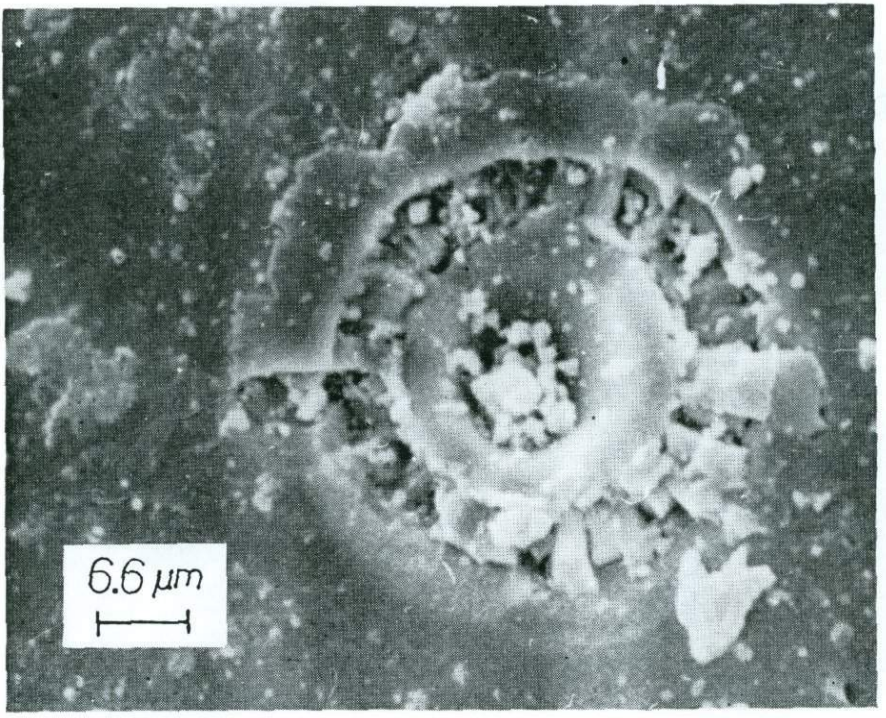
131. Impact crater on the surface of a glassy spherule. Central pit is strongly melted and separated from the spall zone by a marked partly melted rim. The spall zone is sunken relative to the host sphere surface and transected by radial ridges. The zone surface is characterized by clear-cut conchoidal fracture. Luna 16.

131. Ударный кратер на поверхности стеклянной сферулы. Воронка кратера хорошо оплавлена. Четко выраженный оплавленный вал отделяет воронку от зоны откола, предсталяющей собой небольшое понижение (относительно поверхности сферической частицы), пересекаемое радиальными гребнями. Поверхность зоны откола имеет хорошо фиксируемый раковистый излом. „Луна-16".

132. Impact crater on the surface of a glassy spherical particle. All morphological elements of the crater (pit, rim and spall zone) are partly melted. The spall zone is cut across by radial ridges separated by shallow depressions. It is surrounded by a pseudorim formed of material exfoliated at the impact. Luna 16.

132. Ударный кратер на поверхности стеклянной сферической частицы. Хорошо заметна оплавленность всех морфологических элементов кратера: воронки, вала, зоны откола. Последняя пересекается многочисленными радиальными гребнями, разделенными небольщими понижениями. Зону откола окаймляет отслоившийся при ударе материал, который образует внешний „псевдовал". „Луна-16".


10 μm

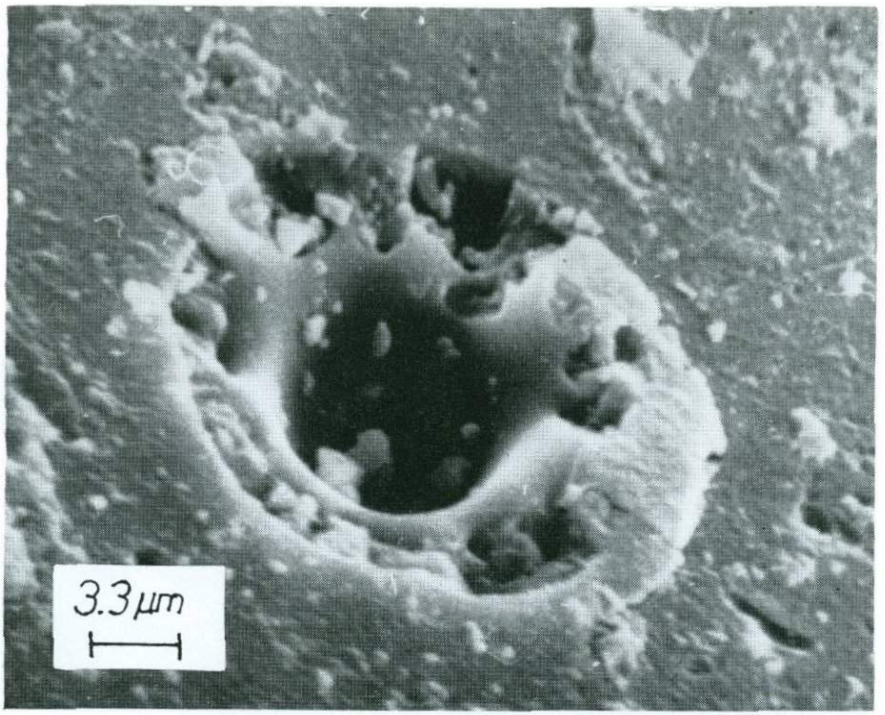

6.6 μm

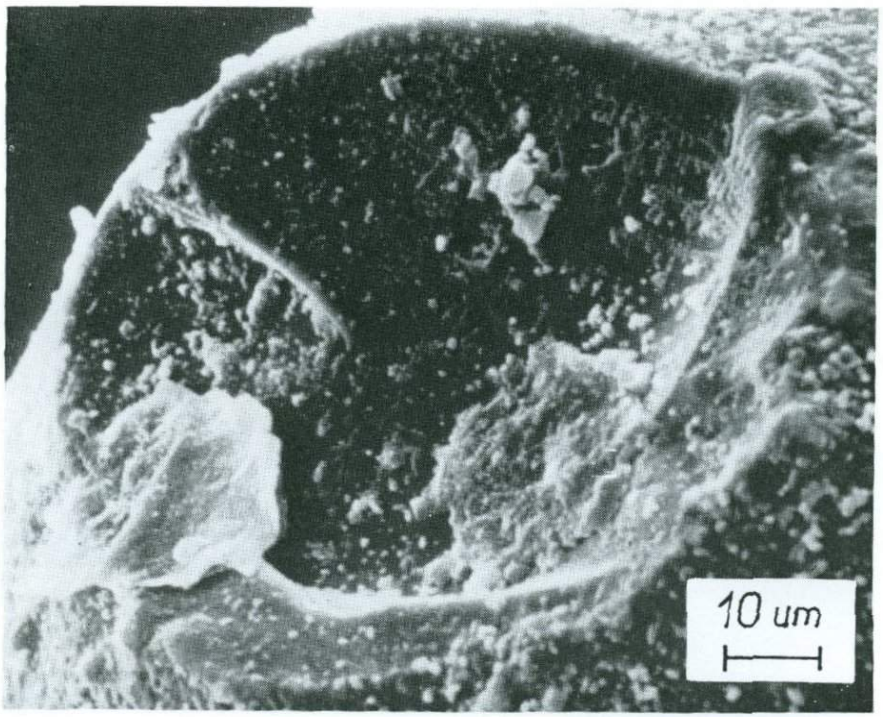
133. Crater on the surface of a glassy spherule with highly melted deep pit and rim. Spall zone is relatively small and discontinuous. Shallow chain-like depressions adjoining the crater on the surface of host spherule (in the lower right-hand corner) were produced by collision of the plastic spherule with minute particles in impact-generated debris cloud. Luna 16.

133. Кратер на поверхности стеклянного шарика. Глубокая воронка кратера и окружающий ее вал хорошо оплавлены. Зона откола относительно небольшая и не везде четко выражена. Рядом с кратером на поверхности стеклянной частицы (на фото внизу справа) видны неглубокие царапины, образовавщиеся при столкновении еще пластичной сферулы с мелкими частицами взрывного облака. „Луна-16".

134. Relatively deep deformation on a glassy spherule formed when part of this was broken out by a low-velocity impact. Note prominent conchoidal fracture. Luna 16.

134. Относительно глубокая низкоскоростная ударная деформация — выкол с крупным раковистым изломом на поверхности стеклянной сферической частицы. „Луна-16".


3.3 μm

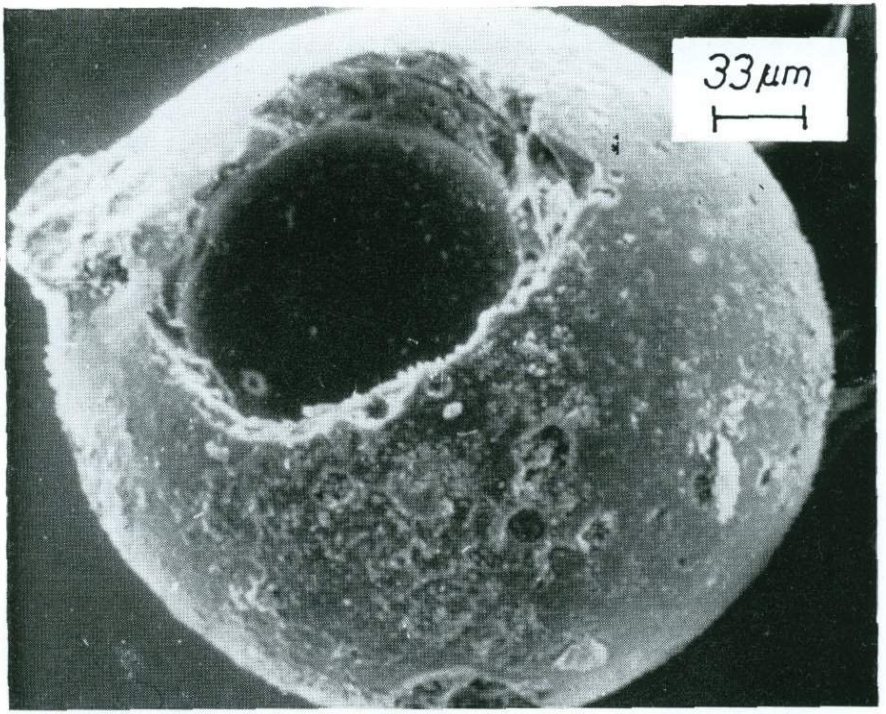

10 um

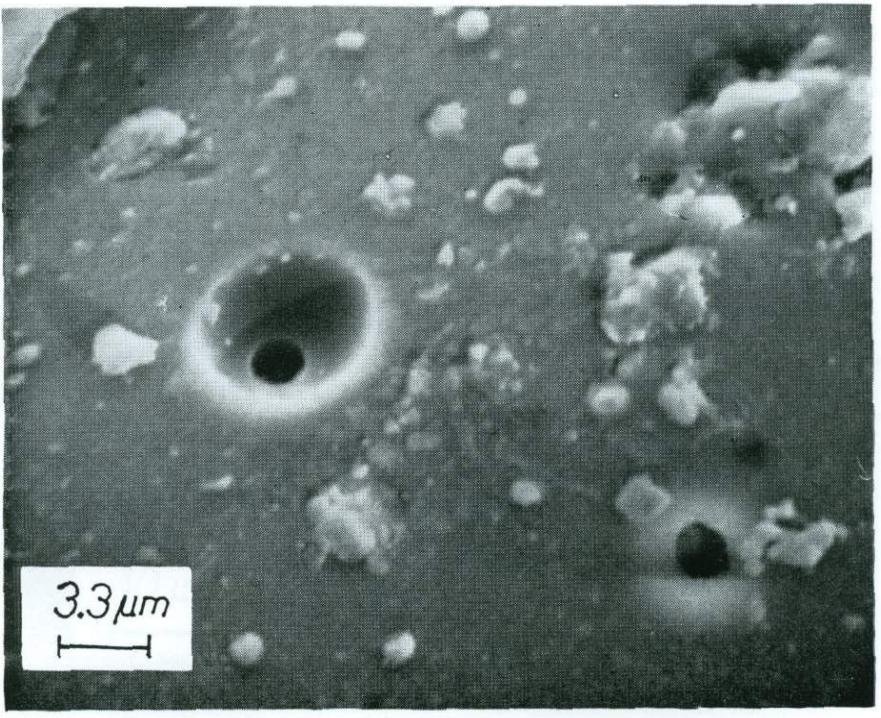
135. Cavity in the body of a glassy spherule, whose origin was probably associated with the escape of gas from the interior of the cooling host sphere. The cavity was exposed by impact when the sphere was completely solidified. The cavity walls are steep and smooth and the outer margin is uneven. Luna 16.

135. Полость в теле стеклянной сферической частицы. Генезис ее связан, вероятно, с выходом газа из „недр" частицы при ее затвердевании. Вскрытие полости произвел, по-видимому, удар, когда частица была в уже полностью затвердевщем состоянии. Стенки полости довольно крутые и гладкие; края, испытавшие неоднократное ударное воздействие, неровные. „Луна-16".

136. A dimple resulting from stripping of a gas inclusion, which occurred near the surface of the glassy spherule. Gas escaped from the still plastic sphere through the hole located in the center of the dimple. Luna 16.

136. Лунка, возникщая в результате вскрытия газового пузыря, образовавшегося у поверхности стеклянной сферической частицы. В центре лунки резко выделяется выходное отверстие, по которому происходило движение газа к поверхности еще не затвердевшей частицы. „Луна-16".


33 μm

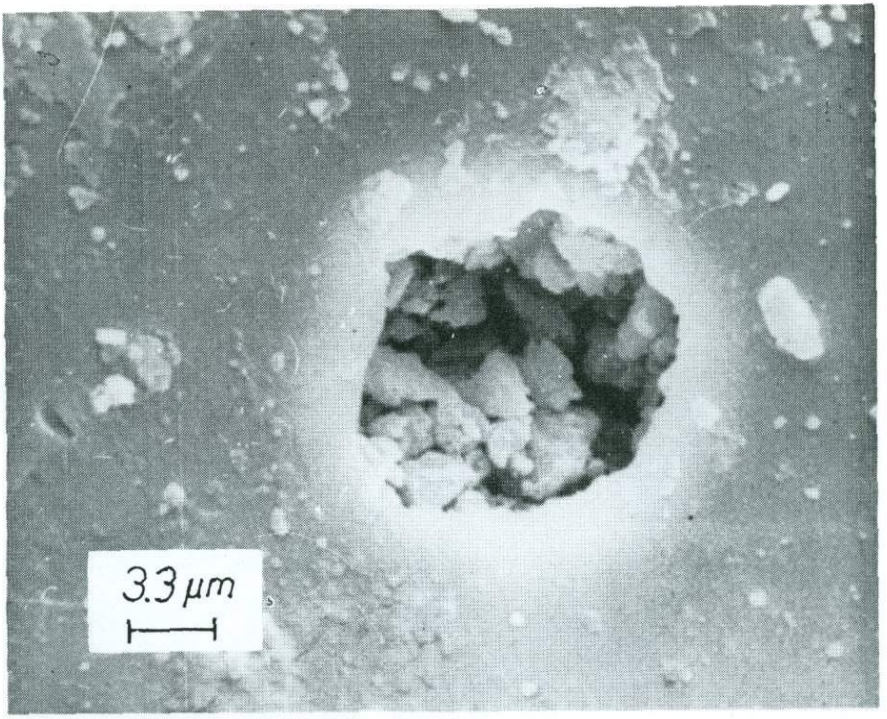

3.3 μm

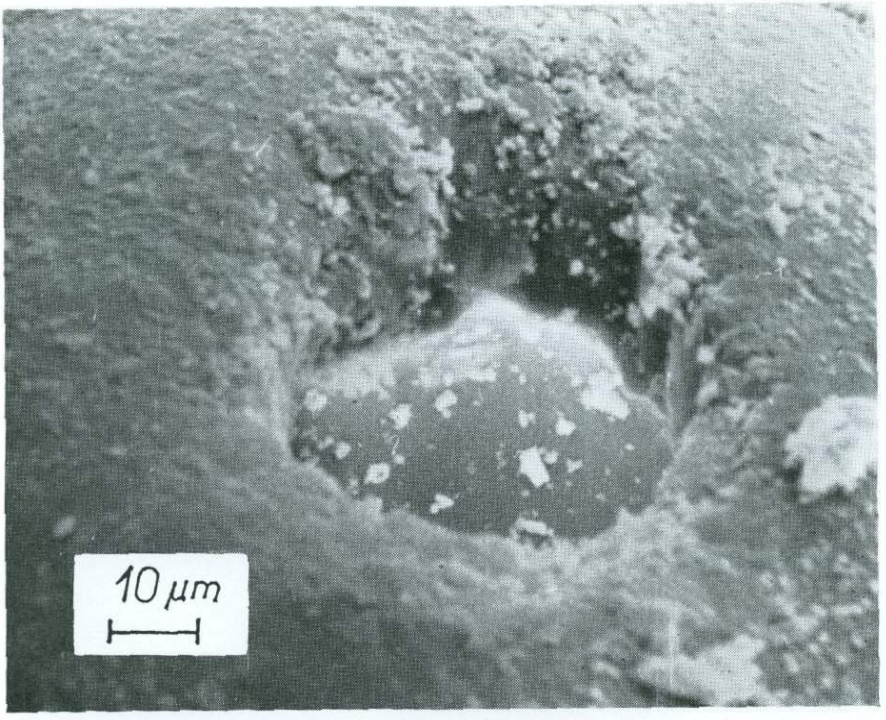
137. A void in a glassy spherule surface, filled with minute particles of lunar regolith and fragments of broken skin that sealed a gas inclusion. The void is fringed by a light-colored 'halo'. Luna 16.

137. Пустота, образовавшаяся в результате вскрытия газовой полости, находящейся в теле сферической частицы. Вскрытое отверстие заполнено мелкими частицами лунного реголита и обломками разрушенной корочки, ограничивающей газовое включение. Хорошо заметно светлое галоподобное кольцо неразрушенной корочки. „Луна-16".

138. Depression on the surface of a glassy spherule (enlarged upper part of Fig. 126). Rounded shapes of both the depression and the elevation in it suggest that they formed inside a still hot particle. Such formations can be assumed to form at the collision of a particle with the glassy sphere when the surface zone of the latter is almost cool but still capable of plastic deformation and its interior is liquid. The impacting particle pierces the plastic envelope and exposes the melt inside. Luna 16.

138. Депрессия на поверхности стеклянного шарика (увеличенное изображение верхнего участка рис. 126). Мягкая сглаженная форма как самой депрессии, так и находящегося в ней возвышения указывает, что такие образования не могли возникнуть в теле стеклянной частицы после полного ее затвердевания. Можно предположить, что образование подобных форм происходит в результате соударения стеклянной сферулы с какой-либо посторонней частицей в момент, когда приповерхностная зона сферулы близка к затвердеванию, но еще достаточно пластичная, а ее внутренняя часть находится в жидком состоянии. При этом инородная частица пробивает пластичную оболочку и вскрывает расплавленное вещество. „Луна-16".


3.3 μm

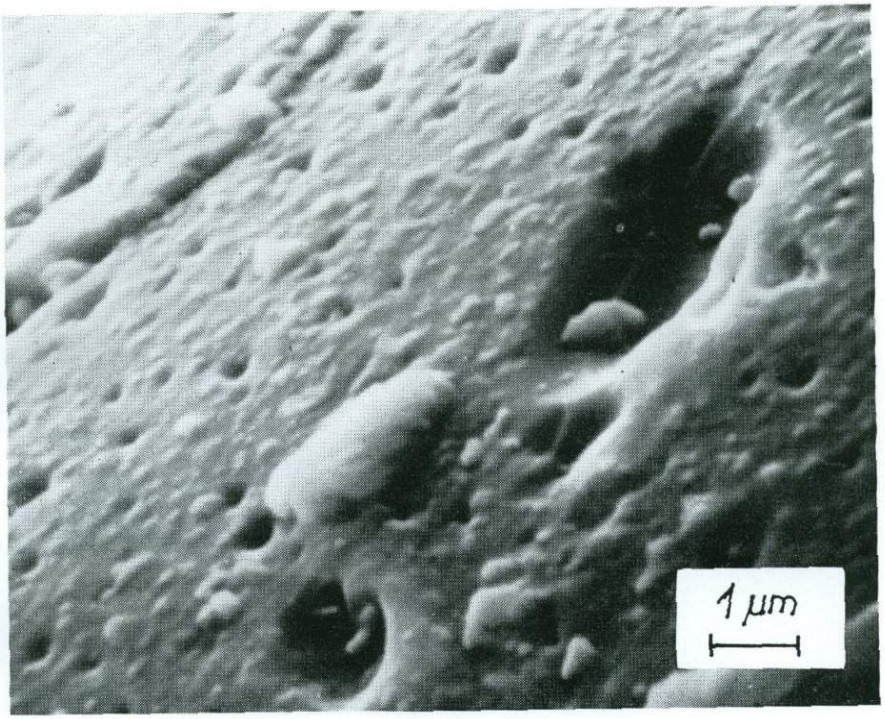

10 μm

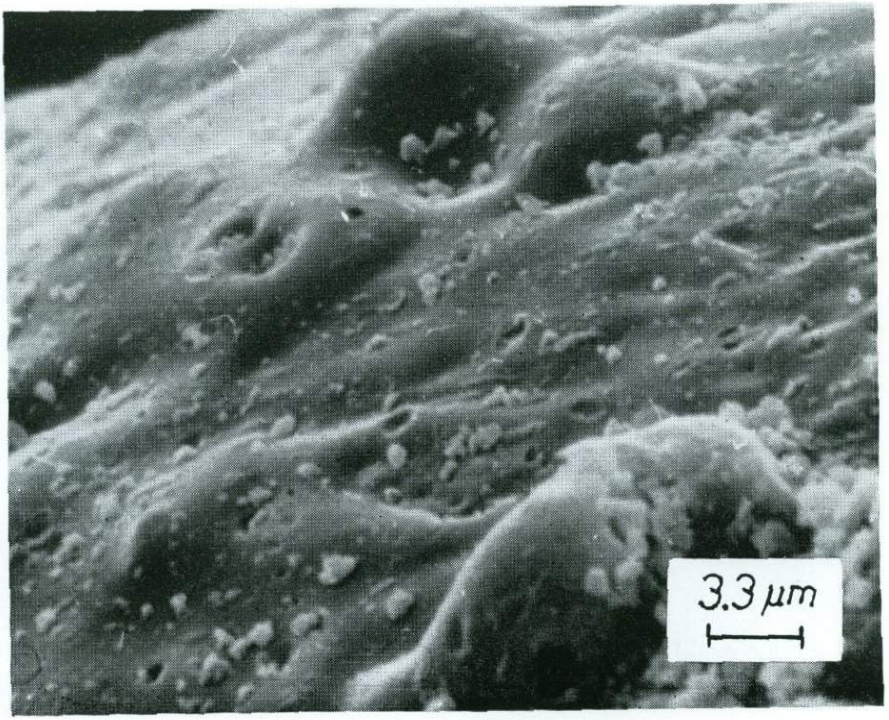
139. Part of glass particle surface with numerous dimples of various dimensions; the dimples were produced by gases escaping from the surface zone of a cooling sphere. Luna 16.

139. Участок поверхности стеклянной сферической частицы с многочисленными лунками различного размера, возникшими при выходе газа из приповерхностной зоны сферулы при ее затвердевании. „Луна-16".

140. Hummocky surface of a silicate spherule, which developed during cooling of the host sphere. Low rounded mounds alternate with shallow dimples. These were produced when expanding gases escaped from the surficial layer of the still hot sphere in the process of its solidification. Luna 16.

140. Бугристая поверхность силикатной сферической частицы, образовавшаяся в процессе затвердевания самой сферулы. Небольшие бугорки мягкой формы сочетаются с неглубокими пологими лунками. Возникновение лунок вызвано экспансией расположенных в приповерхностной части сферулы пузырьков газа из силикатного расплава в процессе затвердевания частицы. „Луна-16".


1 μm

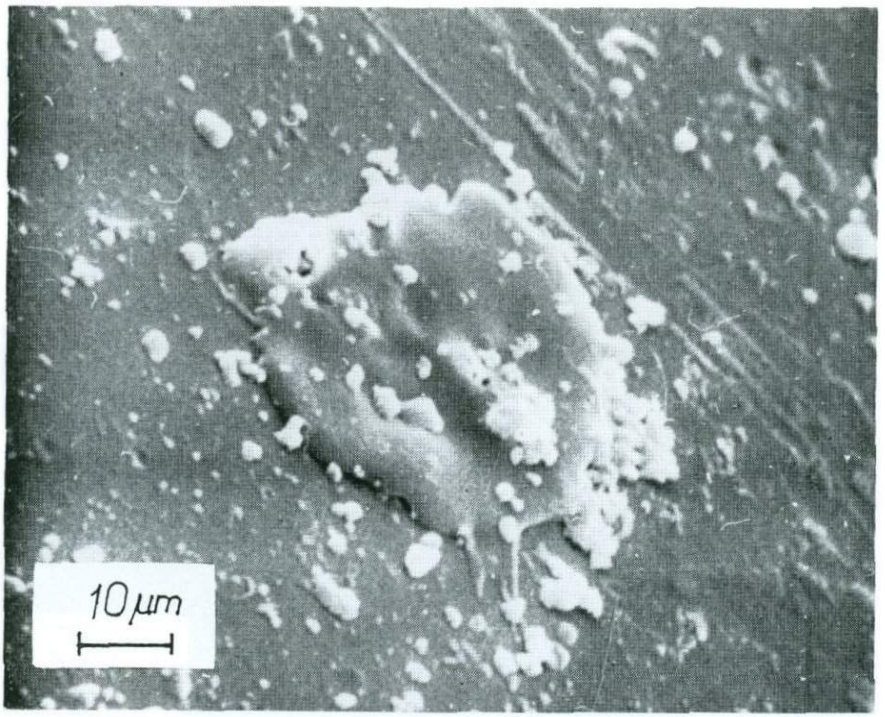

3.3 μm

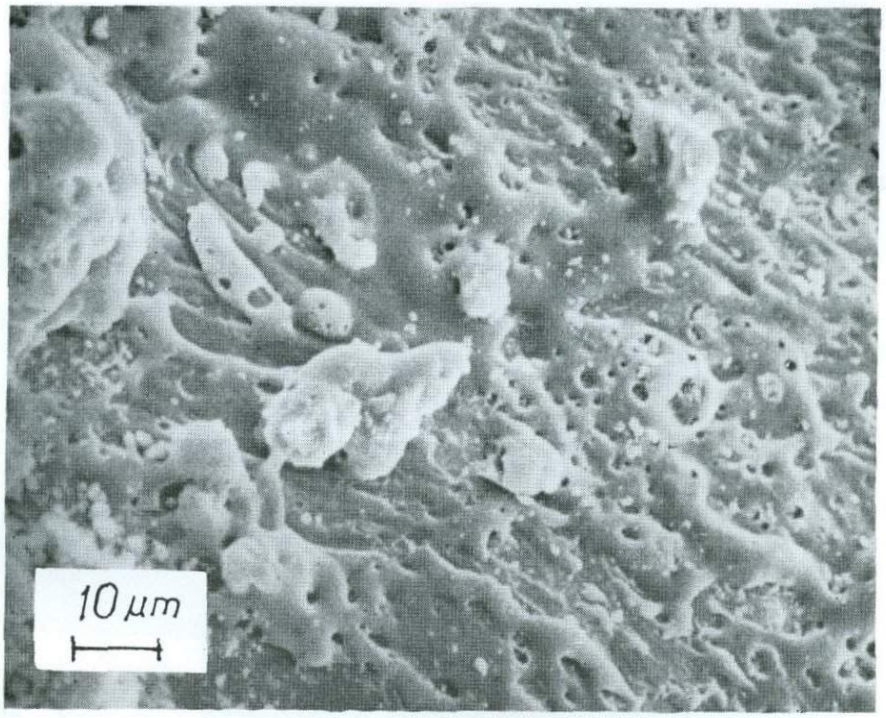
141. Splash of silicate melt which solidified on the surface of a glassy spherical particle. The pores clearly visible on the glass surface were formed most likely by escaping gases from the silicate melt during its cooling and solidification. A series of thin parallel lines to the right of the splash can be tentatively explained in terms of in-flight collision of the splashed silicate material with the sphere. Luna 16.

141. Набрызг силикатного расплава, застывшего на поверхности стеклянной сферической частицы. Хорошо заметны поры в теле застывшего стекла, образованные, вероятно, в результате выхода газа из силикатного расплава во время его охлаждения и затвердевания. Справа (сверху) от набрызга выделяется система параллельных тонких нитей, представляющих собой, по-видимому, также брызги силикатного расплава, попавшие на поверхность сферической частицы, когда она находилась в полете. „Луна-16".

142. Splashes of silicate composition solidified on the surface of a glassy spherica particle in the form of frothy glass. Luna 16.

142. Набрызг силикатного расплава, застывшего на поверхности стеклянной сферической частицы в виде пенистого стекла. „Луна-16".


10 μm

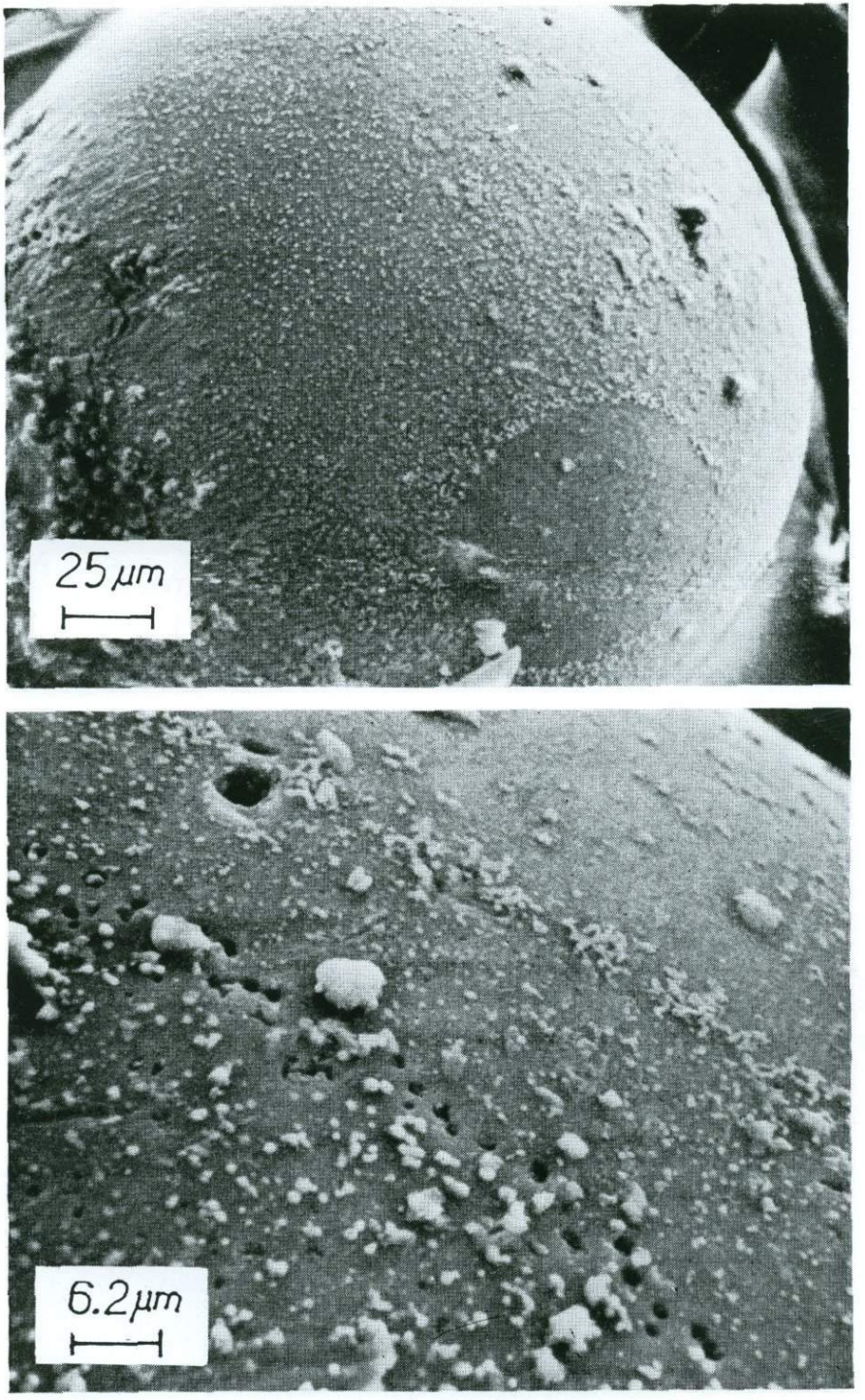

10 μm

143. A silicate spherical particle whose surface is covered with mounds consisting of metallic iron with insignificant Ni (about 0.4 wt. %) and Co (about 0.3 wt. %) admixtures. The mounds are the products of condensation or liquation. Luna 16.

143. Силикатная сферическая частица с поверхностью, покрытой металлическими железными (с примесью небольшого количества Ni — около 0,4 вес. % и Co — около 0,3 вес. %) сферическими бугорками, образование которых может быть, по-видимому, связано с двумя процессами — конденсацией и (или) ликвацией. „Луна-16".

144. Surface of a silicate spherical particle covered with mounds of metallic iron having a low proportion of nickel. Small dimples in the central part of the figure show similar dimensions and shape to those of metallic mounds. The dimples are depressions from which mounds had fallen out during cooling of the glassy sphere. Luna 16.

144. Участок поверхности силикатной сферической частицы, покрытый бугорками металлического железа с небольшой примесью никеля. В центре рисунка отчетливо видны небольшие ямки, размер и форма которых близки размеру и форме металлических бугорков. Очевидно, подобные ямки образуются в том случае, когда бугорки выпадают из тела стеклянной сферулы при ее охлаждении. „Луна-16".

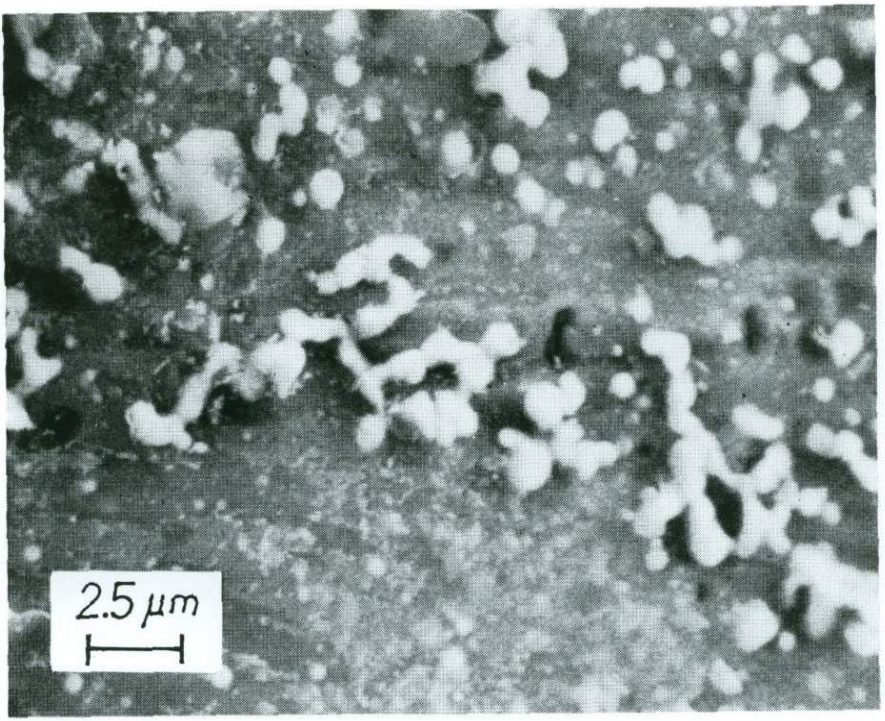

25 μm
6.2 μm

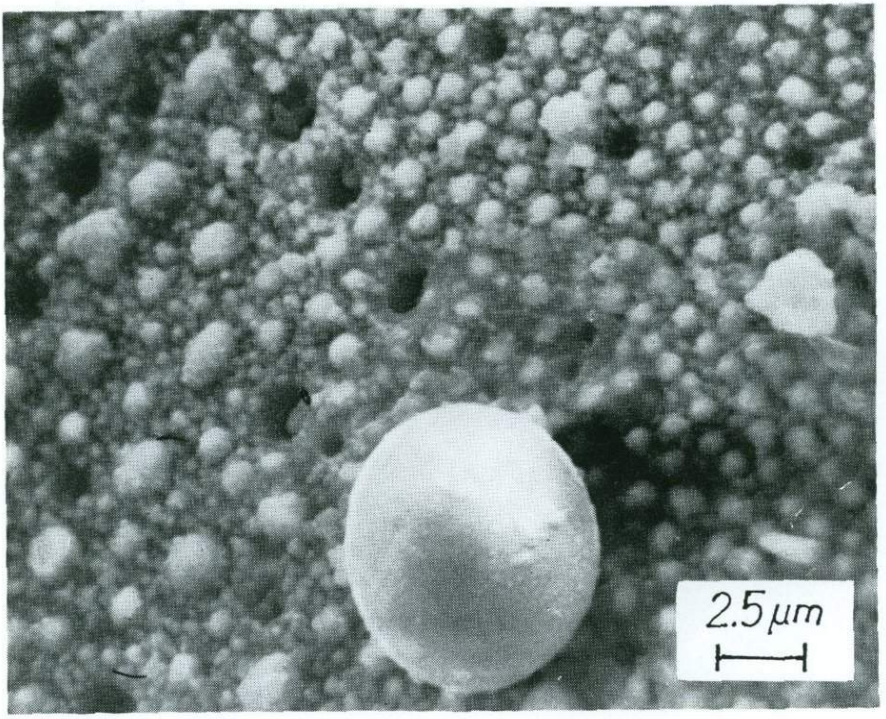
145. Enlarged detail of the surface of a silicate particle (Fig. 144) with iron mounds of rounded shape, which aggregate into irregular formations. Luna 16.

145. Увеличенное изображение участка поверхности силикатной частицы (рис. 144) с железными сферическими бугорками, образующими скопления. „Луна-16".

146. A silicate spherical particle with Fe-Ni mounds (Ni = 10 wt %), which are embedded in its surface. Metallic mounds were generated by condensation of the gas phase *or in result of liquation. Luna 20.*

146. Поверхность силикатной сферической частицы с внедренными в нее Fe-Ni (Ni = 10 вес %) сферулами, образованными, вероятно, либо при конденсации из паровой фазы, либо в результате ликвации. „Луна-20".


2.5 μm

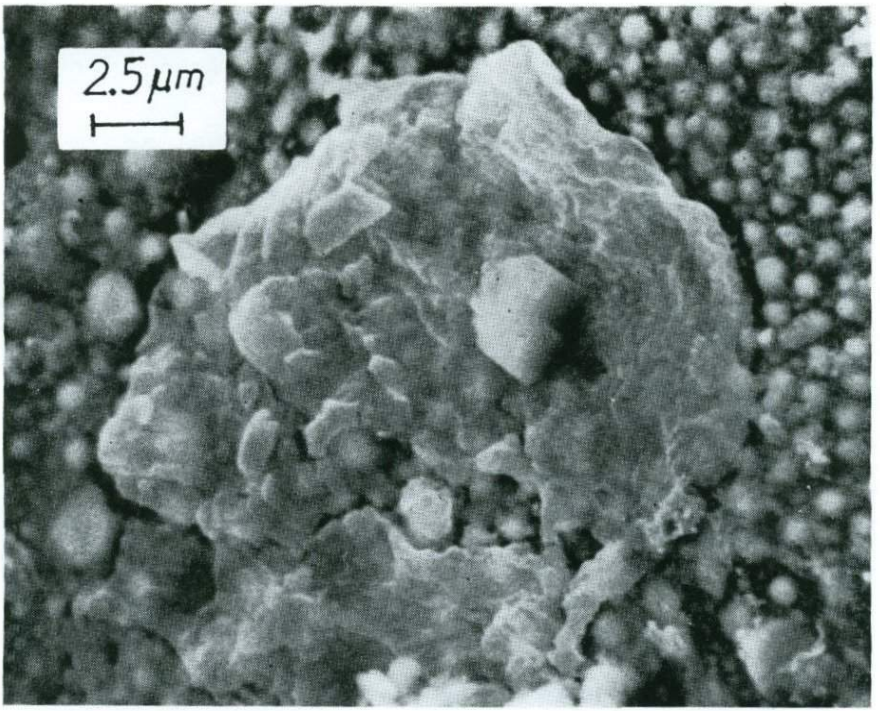

2.5 μm

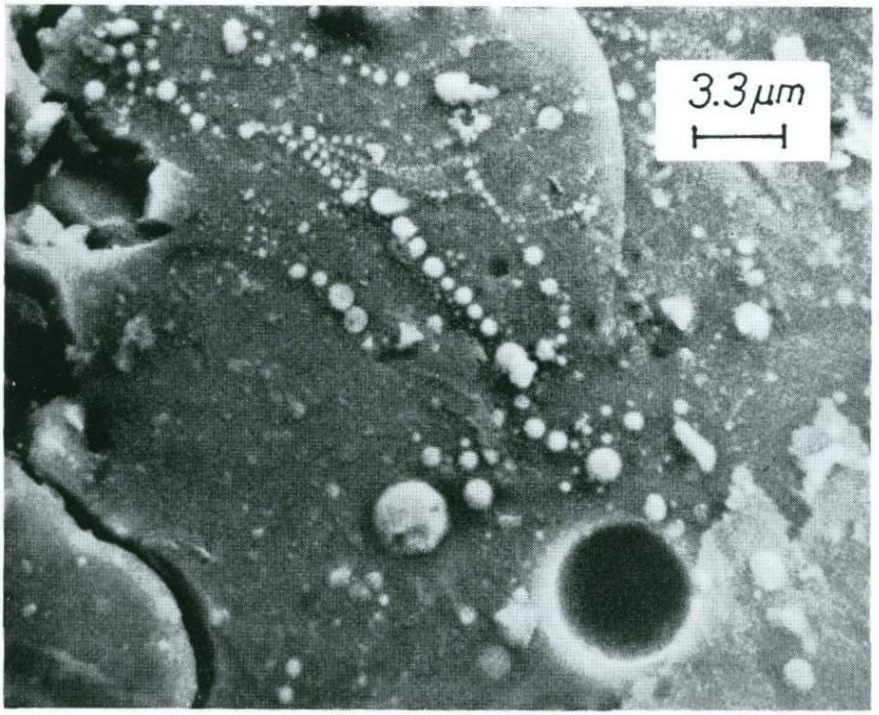
147. Tiny rounded mounds of Fe-Ni composition on a spherical particle. Thin semitransparent skin of silicate (plagioclase) composition in the center covers part of the host spherule. The skin is probably a product of condensation of the silicate gas phase. Luna 20.

147. Скопления мелких Fe-Ni сферических бугорков на поверхности сферической частицы. В центре рисунка — тонкая полупрозрачная пленка силикатного (плагиоклазового) состава, покрывающая часть поверхности. Пленка представляет собой, возможно, конденсат из газовой силикатной фазы. „Луна-20".

148. Trains of spherical mounds of FeS composition on the surface of a silicate spherule. The round dimple near the bottom may have been left after the falling out of a FeS mound from the spherule. Luna 20.

148. Цепочки сферических FeS бугорков на поверхности силикатной сферической частицы. Округлая лунка образована, вероятно, вследствие выпадения FeS бугорка из сферулы. „Луна-20".


2.5μm

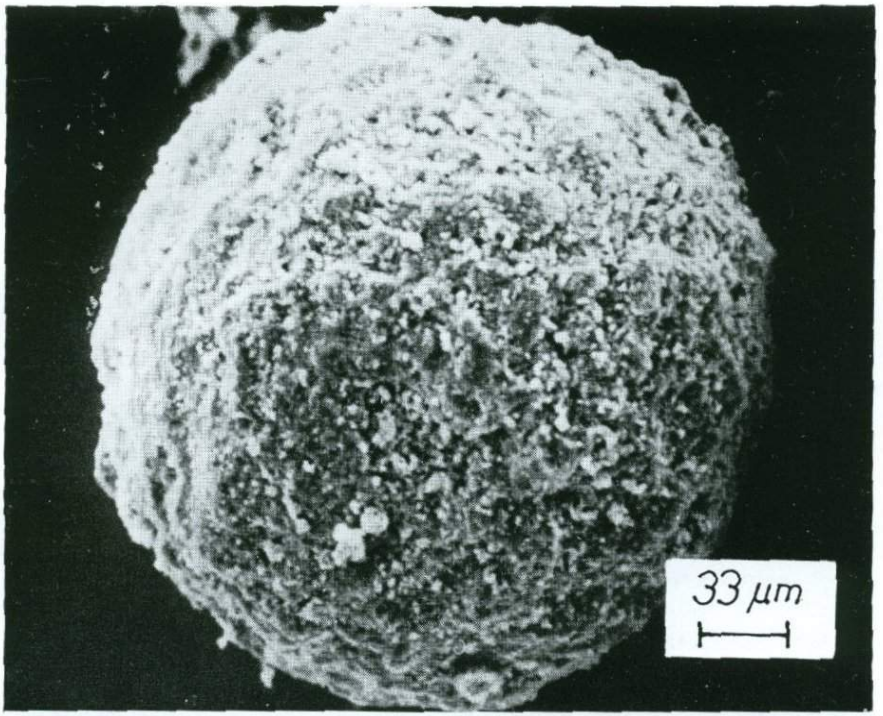

3.3μm

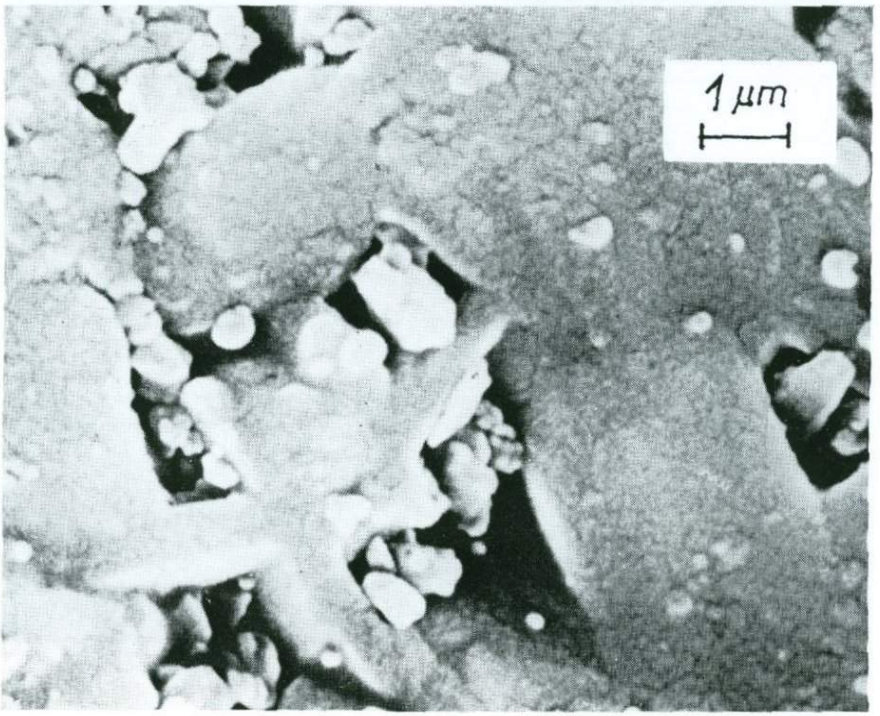
149. Overall view of a chondrule — partially crystallized glassy spherule. The particle has a spherical shape typical of chondroids and hummocky surface, on which fine regolith dust particles are attached. Luna 16.

149. Общий вид хондроида — раскристаллизованного стеклянного шарика. Частица характеризуется типичной для хондроидов сферической формой и неровной, шероховатой поверхностью. Рельеф поверхности хондроида осложнен прилипшими мелкими частицами реголита. „Луна-16".

150. Part of the chondrule surface showing well defined crystalline texture. Elongated crystals make a nearly right angle. Luna 20.

150. Участок поверхности хондроида с отчетливо проявленной раскристаллизацией вещества. Хорошо заметны шестоватые кристаллы, пересекающиеся под углом, близким к прямому. „Луна-20".


33 μm


1 μm

METALLIC PARTICLES AND METALLIC INCLUSIONS
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ И МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

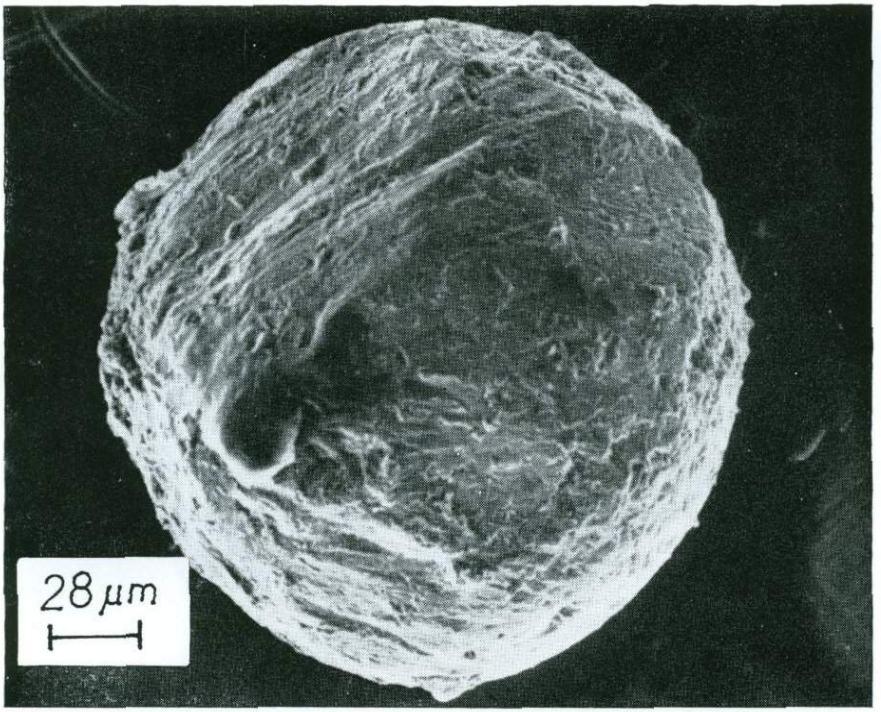
Metallic particles
Металлические частицы

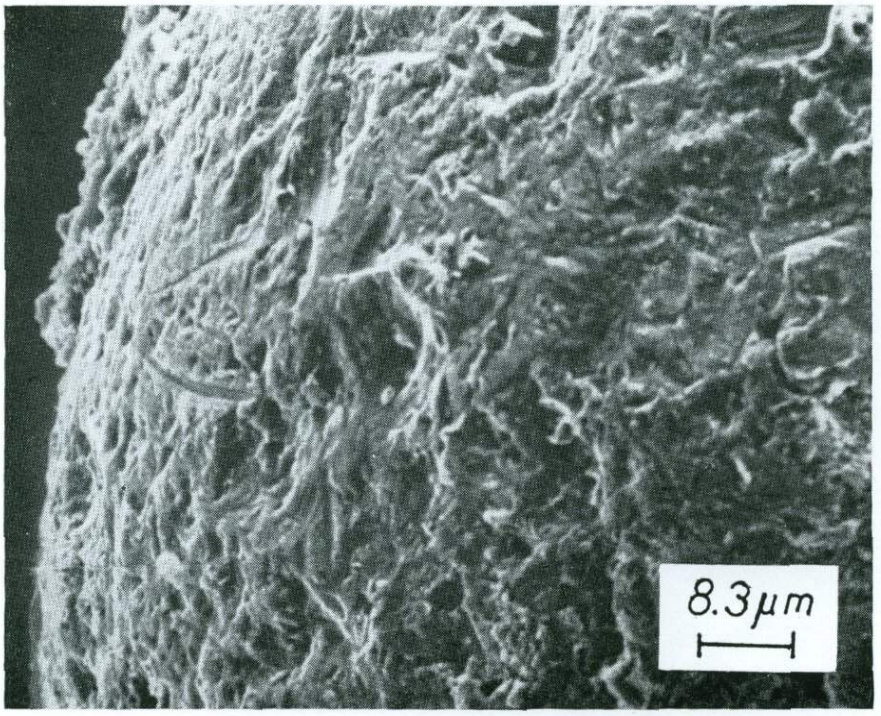
151. Metallic spherical particle with Fe-Ni composition (Ni content 9.5 wt %). The central part of the spherule surface does not show any changes. The surface on the upper and lower left is characterized by linear structures. Impact deformations are well seen at the top and on the right. The particle is of impact origin; it formed by cooling of metallic melt of meteoritic origin. The regular distribution of linear forms meeting at a uniform angle may be interpreted as a manifestation of the internal crystalline texture of the metallic particle which was produced at recrystallization of the melt. However, these linear forms may also be grooves and scratches generated at particle collision in an impact-produced cloud or on the lunar surface by mechanical action of regolith fines on a still hot plastic metallic particle. Luna 20.

151. Общий вид металлической сферической частицы (Fe-Ni состава с содержанием Ni-9,5%), центральная часть которой сохранила неизмененную поверхность. Поверхность частицы слева (наверху и внизу) осложнена линейными формами. Сверху и справа хорошо видны ударные деформации. Частица имеет ударный генезис, являясь застывшей каплей расплавленного метеоритного металла. Закономерное распространение линейных форм под постоянным углом позволяет предположить, что они являются проявлением внутренней кристаллической структуры тела, сформировавшейся при раскристаллизации капли. Возможно также, что линейные формы представляют собой царапины и борозды, образование которых могло произойти как во взрывном облаке при столкновении частиц, так и на лунной поверхности в результате механического воздействия мелких частиц реголита на еще не полностью затвердевшую пластичную металлическую частицу. „Луна-20".

152. Part of a Fe-Ni spherule surface (enlarged left lower part of Fig. 151) showing its complicated structure. Luna 20.

152. Участок поверхности Fe-Ni сферулы (увеличенное изображение нижней левой части рис. 151), характеризующий сложную структуру поверхности металлической частицы. „Луна-20".


28 μm

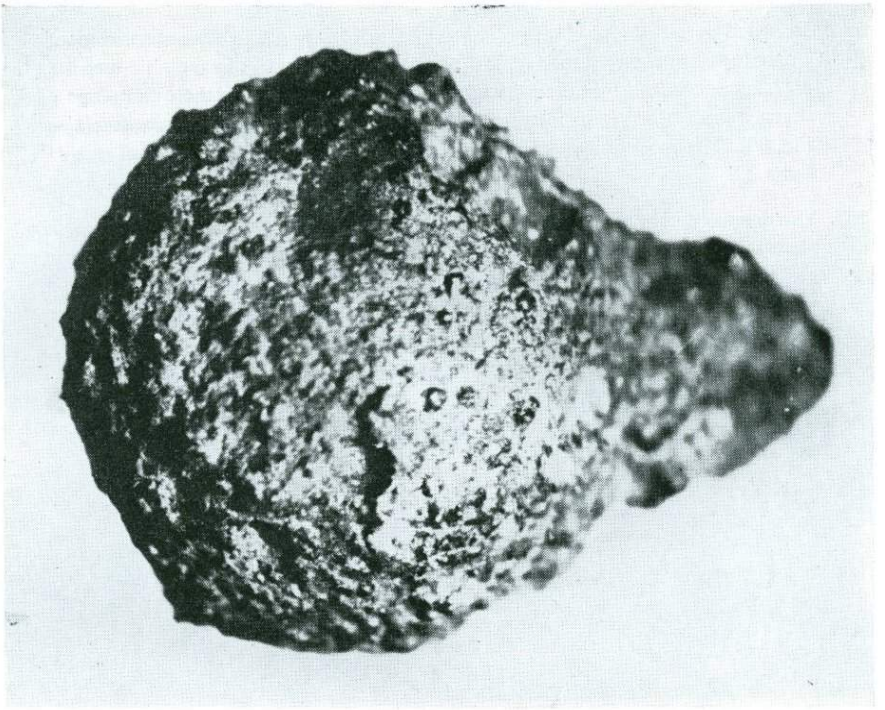

8.3 μm

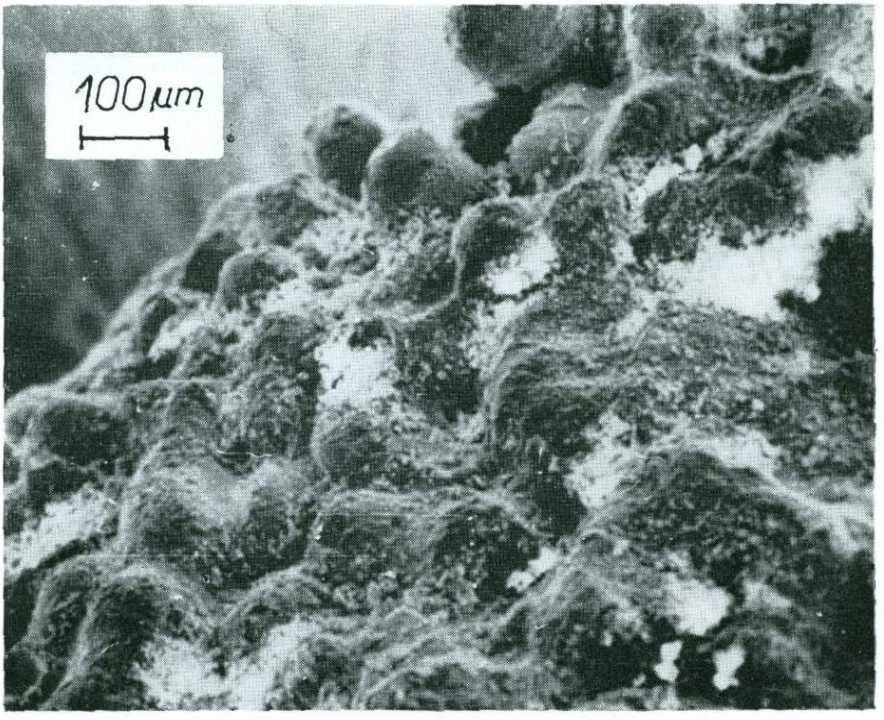
153. A pear-shaped metallic particle viewed in a binocular microscope (magnification 10×). Details of some surface parts are shown in Figs. 154—160. Luna 20.

153. Изображение общего вида металлической частицы грушевидной формы, *полученное с использованием бинокулярного микроскопа (увеличение 10×).* Снимки отдельных участков поверхности частицы следуют ниже (см. рис. 154—160). „Луна-20".

154. Globular structure of the metallic particle surface from Fig. 153. Mineralogical and chemical analyses have shown that these globules correspond to kamacite and are bound with kamacite-phosphide eutectic. Light spots are cumulations of finely dispersed highland regolith dust. Luna 20.

154. Глобулярное строение участка поверхности металлической частицы, изображенной на рис. 153. Глобулы, по составу отвечающие камаситу, связаны камасит-фосфидной эфтектикой (по данным минералогического и химического анализов). Белые пятна на поверхности демонстрируемого участка — скопления тонкодисперсных частиц материкового реголита. „Луна-20".



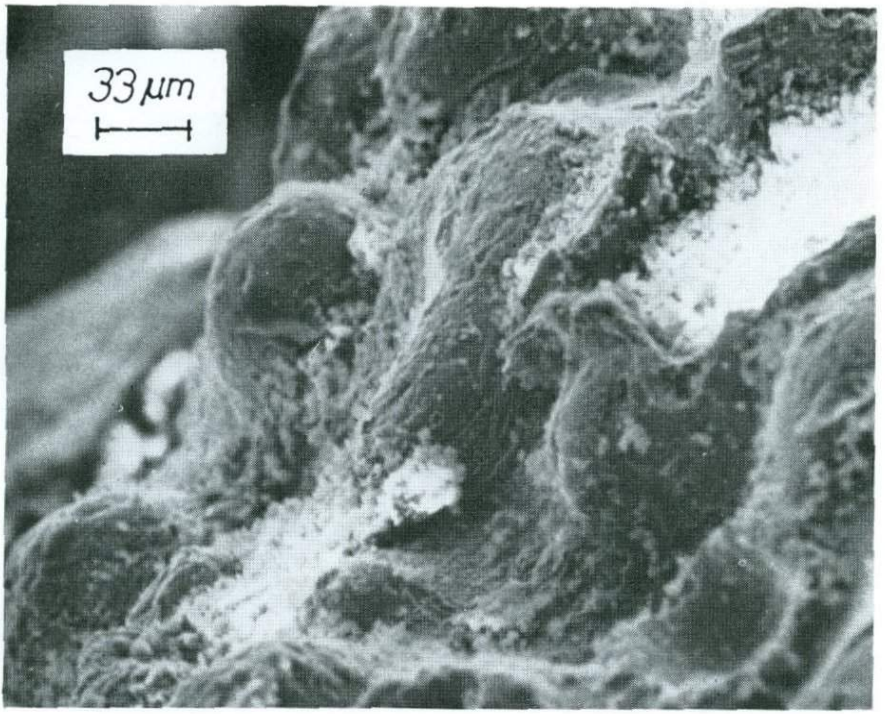

100 µm

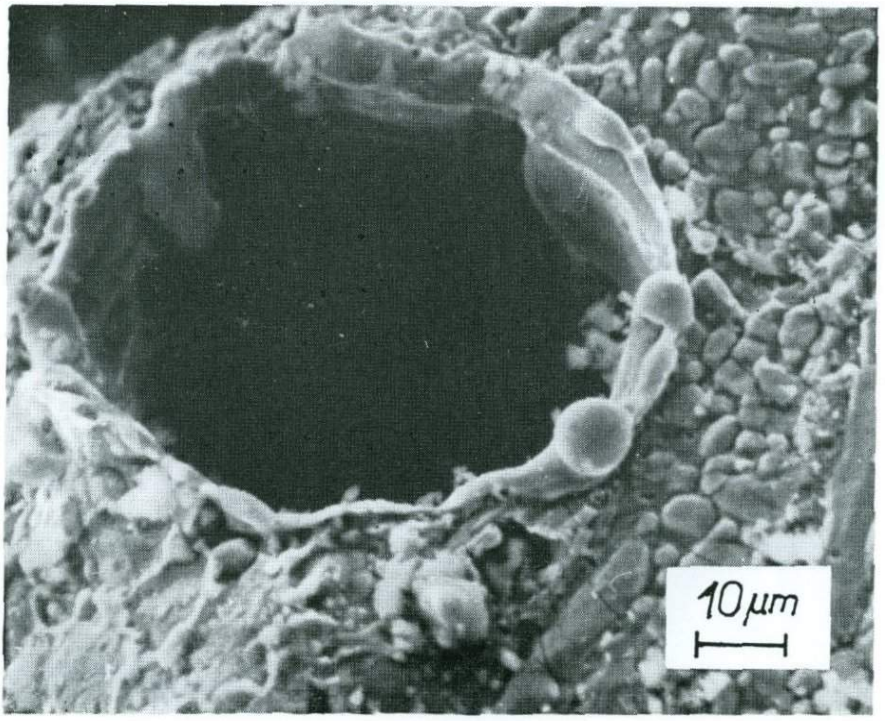
155. Enlarged detail of globules illustrated in Fig. 154 (lower left portion). Impact crater (bottom right) shows typical morphology of craters in metallic targets: the pit is characterized by saucer-like form and smooth surface; the outer slope of the sharply contoured rim is incomplete as if bent inside at some places (see also Fig. 33). The morphology of the rim is affected by the 'plastic' flow of metal. Luna 20.

155. Увеличенное изображение глобул, представленных на рис. 154 (нижняя левая часть). Внизу справа — ударный кратер, морфология которого весьма типична для кратеров на металлических мишенях: ударная воронка характеризуется чашевидной формой и гладкой поверхностью, четко выраженный вал имеет недостроенный, местами как бы подогнутый внешний склон с резкими очертаниями (см. также рис. 33). В морфологии вала четко проявляется пластичное течение металла. „Луна-20".

156. Part of the surface of the metallic particle shown in Fig. 153. The deep regular rounded depression resembles a gas cavity in its morphological features (absence of rim, wall steepness, nearly circular shape). Minute elliptical grains on the particle surface are probably the products of condensation. Luna 20.

156. Участок поверхности металлической частицы, представленной на рис. 153. Глубокая депрессия правильной округлой формы в теле металлической частицы по морфологическим признакам (отсутствие вала, отвесность стенок, строго округлая форма) напоминает газовую полость. Мелкие зерна эллипсоидальной формы на поверхности металлической частицы можно, вероятно, отнести к конденсатным образованиям. „Луна-20".


33 µm

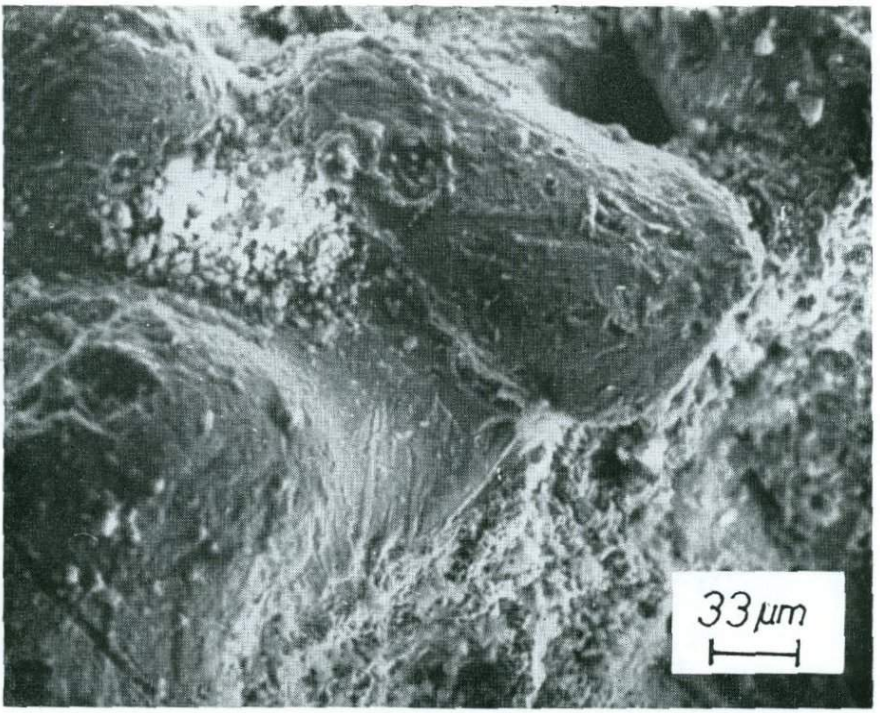

10 µm

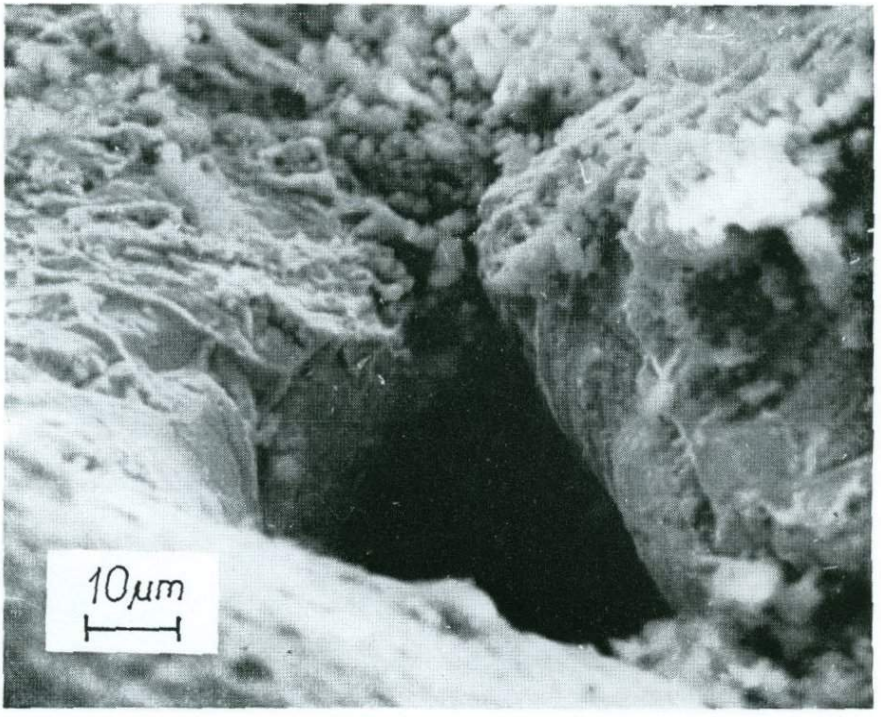
157. Part of the metallic particle surface shown in Fig. 153. Intricate globular surface structure is well seen. Luna 20.

157. Участок поверхности металлической частицы, представленной на рис. 153, со сложным глобулярным строением. „Луна-20".

158. Enlarged upper right-hand portion of Fig. 157. The deep triangular pore in the center originated probably at the place of an aggregation of not interconnected globules. Luna 20.

158. Увеличенное изображение верхней правой части рис. 157. В центре рисунка — глубокая пора треугольной формы, возникшая, вероятно, при агрегировании мелких глобул в месте, где между ними отсутствует контакт. „Луна-20".


33μm

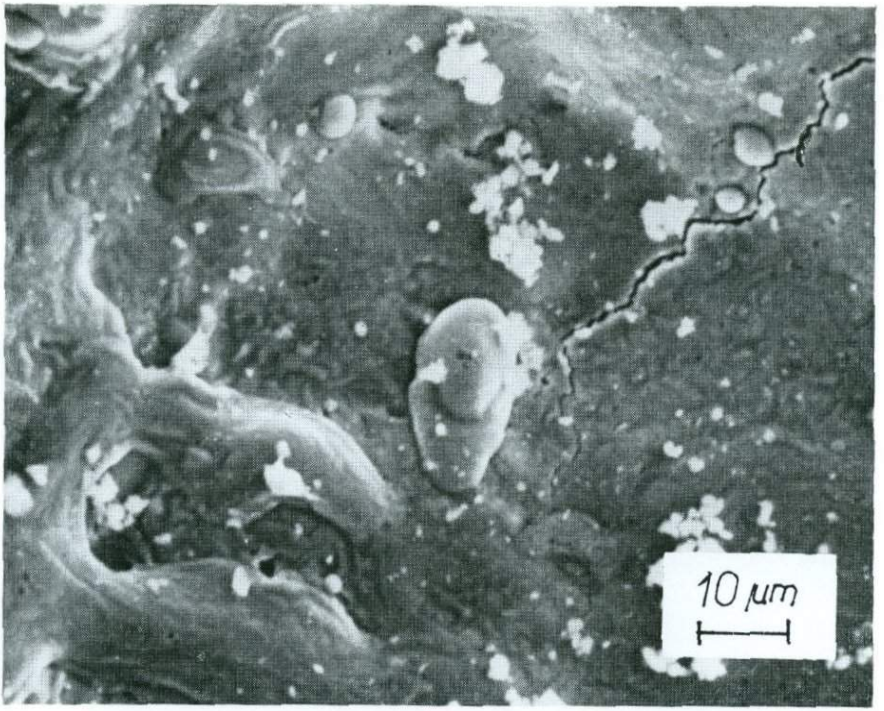

10μm

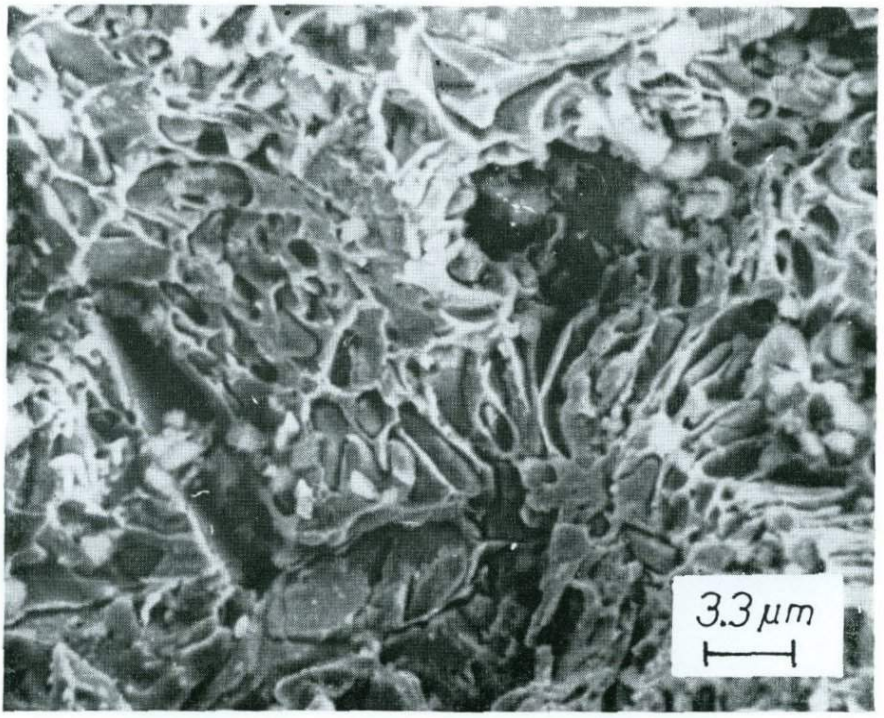
159. Part of the metallic particle shown in Fig. 153. Note flow phenomena on the left and a thin contraction fissure on the right. The spherical mound of FeS composition in the center is probably the product of gas condensation. Luna 20.

159. Участок поверхности металлической частицы, представленной на рис. 153, слева на снимке хорошо заметны элементы течения материала частицы, застывшего при ее охлаждении. Тонкая трещина (в правой части рисунка), четко прослеживающаяся на поверхности демонстрируемого участка, является трещиной охлаждения. В центре — сферическая частица — Fe-FeS состава, возникшая, вероятно, при конденсации из газовой фазы. „Луна-20".

160. Surface structure of the metallic particle shown in Fig. 153. The mosaic pattern of the surface reflects the inhomogeneous composition of the particle; kamacite-phosphide eutectic phases are distinguishable in the surface morphology. Luna 20.

160. Структура участка поверхности металлической частицы, изображенной на рис. 153. Мозаичность рельефа свидетельствует о неоднородности состава частицы: в ее морфологии четко выражена камасит-фосфидная эвтектика. „Луна-20".


10 μm

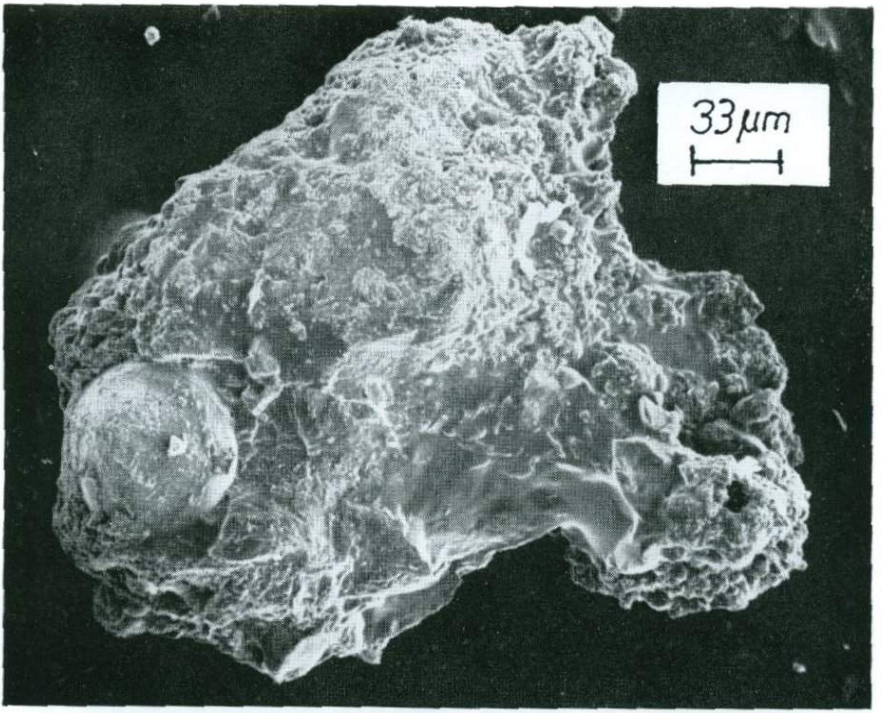

3.3 μm

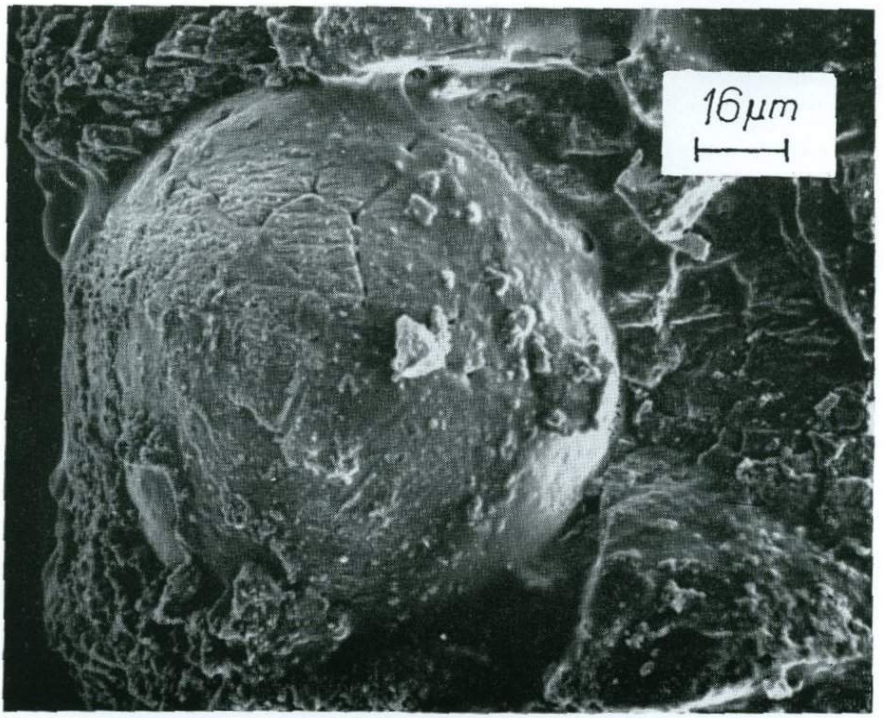
161. Fragment of regolith breccia in which a Fe-Ni spherule (with 8.0 wt. % Ni) is embedded. The spherule formed by solidification of metallic melt of meteoritic origin, which impacted the lunar surface. The sphere seems to have fallen on loose regolith, before its lithification. Luna 20.

161. Фрагмент реголитовой брекчии с включенным в нее металлическим (Fe-Ni состава, Ni = 8,0 %) шариком, представляющим собой застывшую каплю метеоритного расплава, образовавшегося при падении на Луну метеоритного тела. Вероятно, шарик упал на поверхность реголита, подвергшегося впоследствии литификации. „Луна-20".

162. Enlarged detail of a metallic spherule (left portion of Fig. 161). The cracks on its surface formed along the boundaries of irregular Fe grains during cooling of the host spherule. Luna 20.

162. Увеличенное изображение металлического шарика (левая часть рис. 161). Трещины на поверхности шарика образовались, вероятно, при его охлаждении вдоль отдельных неправильной формы зерен, составляющих металлическую частицу. „Луна-20".


33μm


16μm

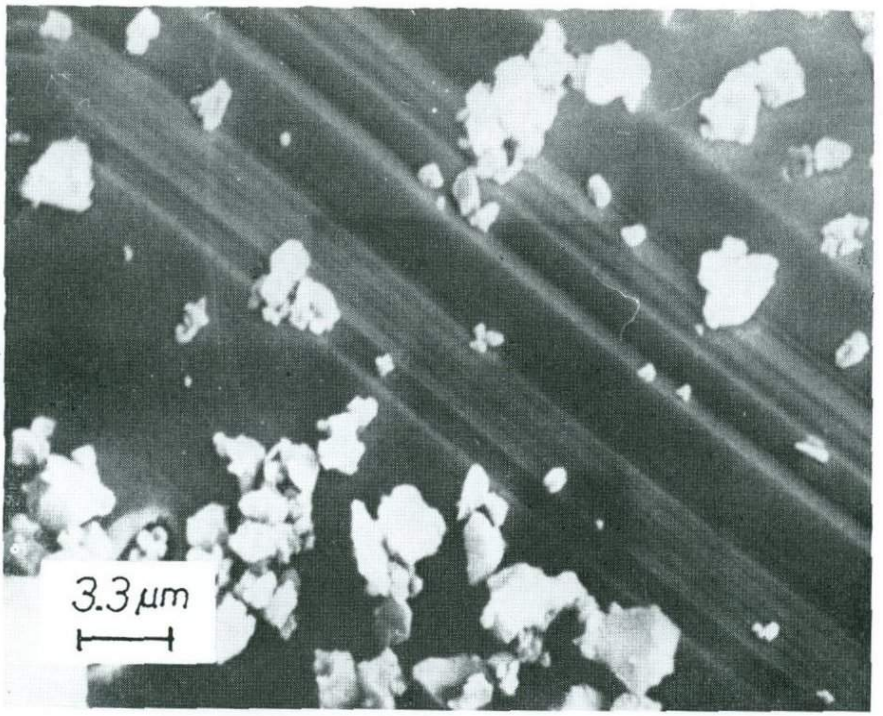
Metallic inclusions
Металлические включения

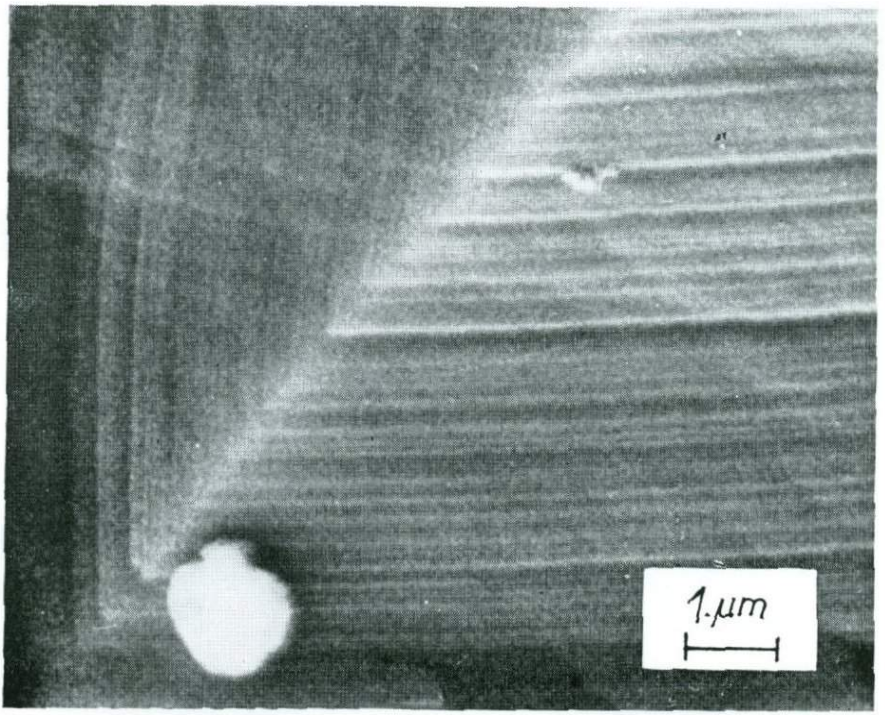
163. Growth steps on the surface of metal enclosed in ANT rock (enlarged dark portion in the left part of Fig. 37). Light-colored irregular spots are attached regolith particles. Luna 20.

163. Ступени роста на поверхности металла, включенного в породу АНТ состава (увеличенное изображение поверхности темного участка в левой части рис. 37). Белые пятна неправильной формы — прилипшие мелкие зерна реголита. „Луна-20".

164. Growth steps on the surface of metallic inclusion in ANT rock (enlarged dark portion from Fig. 37, right bottom). The orientation of growth steps expresses cubic symmetry of the crystal. A tiny regolith particle is attached in the left lower part of the photograph. Luna 20.

164. Ступени роста на поверхности металла, включенного в породу АНТ состава (увеличенное изображение поверхности темного участка нижней правой части рис. 37). Направление ступеней роста отражает кристаллизацию металла в кубической сингонии. Слева внизу — прилипшая мелкая частица реголита. „Луна-20".


3.3 µm


1. µm

12 руб.

АТЛАС МИКРОФОТОГРАФИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Книга является плодом международного сотрудничества по изучению образцов лунного грунта между Академией Наук СССР и Чехословацкой академией наук. Это сотрудничество осуществляется в программе Интеркосмос. Полученные данные о морфологии частиц лунного реголита могут информировать о характере экзогенных процессов, происходящих на Луне, и о их воздействии на всю лунную поверхность. Изучение генезиса отдельных форм этих частиц является ценным источником информаций о геологической истории лунных частиц и о генезисе вторичных пород Луны.

Изучение поверхностной морфологии частиц реголита, доставленного САС из районов лунного моря (Луна 16) и материка (Луна 20), проводилось методом растровой электронной микроскопии и иллюстрировано 164 микрофотографиями.

Сопроводительный текст делится на 4 главы. Во вступительной части дается общая характеристика реголита. Следующая глава знакомит с методом исследования поверхности частиц реголита. Основная часть посвящена морфологической характеристике поверхности частиц реголита. В ней дано описание как первичных магматических пород (породы базальтового, габроидного и анортозитового типов), так и вторичных пород (брекчии, агглютинаты, стекла и стеклянные сферические частицы) и, наконец, металлических частиц и включений металла в фрагментах пород. Заключительная глава посвящена генетической интерпретации микроморфологии поверхности лунных частиц.

Данная работа содержит в себе отправные материалы для сравнительного изучения образцов из остальных районов Луны и любых других космических тел. Микрофотографический атлас снабжен текстом на английском и русском языках и предназначен для широкого международного круга специалистов.

2999