

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/349917258>

# The Orgueil meteorite (Atlas of microfossils)

Book · October 2020

CITATION

1

READS

348

8 authors, including:



**Richard Brice Hoover**

The University of Buckingham

436 PUBLICATIONS 3,388 CITATIONS

SEE PROFILE



**Olga Samylina**

Winogradsky Institute Of Microbiology

49 PUBLICATIONS 190 CITATIONS

SEE PROFILE



**Krasavin Eugene**

Joint Institute for Nuclear Research

171 PUBLICATIONS 1,121 CITATIONS

SEE PROFILE



**Anton Ryumin**

Joint Institute for Nuclear Research

3 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



NAA of Carbonaceous Meteorites [View project](#)

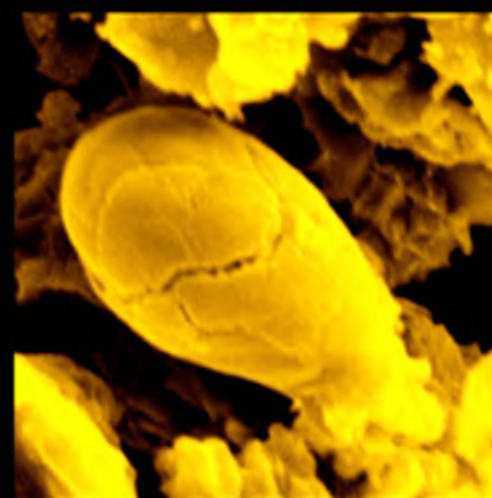
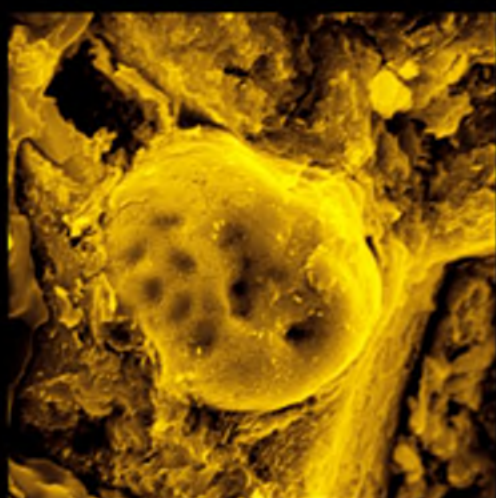
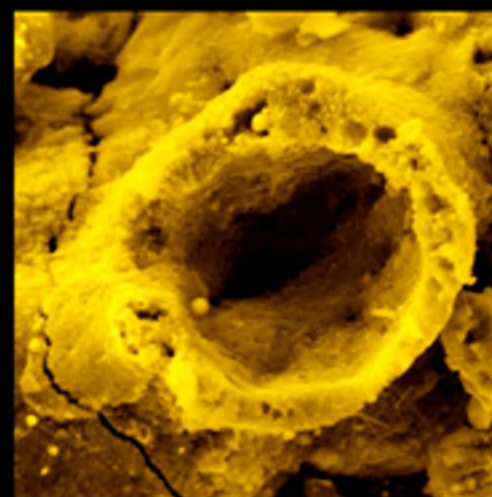
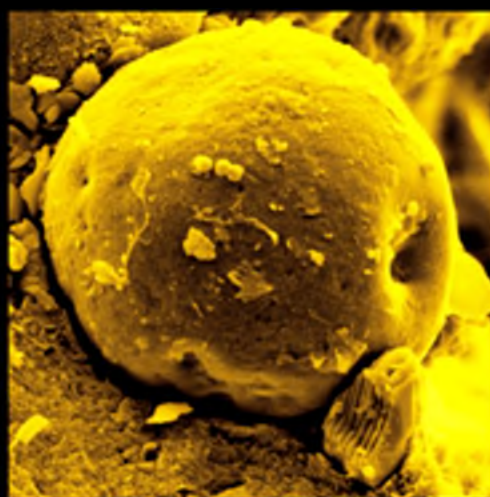
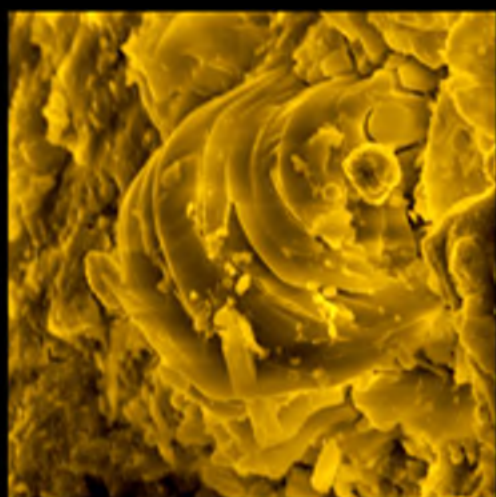


Radiation DNA damage and DNA double strand break repair and misrepair [View project](#)

Объединенный институт ядерных исследований  
Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН  
Институт микробиологии имени С.Н. Виноградского РАН  
Космический и Ракетный Центр Соединенных Штатов, Хантсвилл, Алабама, США  
Научный совет РАН по астробиологии

# МЕТЕОРИТ ОРГЕЙ АТЛАС МИКРОФОССИЛИЙ

А.Ю. Розанов, Р.Б. Хувер, Е.А. Красавин, О.С. Самылина,  
А.К. Рюмин, М.И. Капралов, Е.А. Сапрыкин, А.Н. Афанасьева





Объединенный институт  
ядерных исследований



Палеонтологический институт  
им. А.А. Борисяка  
Российской академии наук



Институт микробиологии  
им. С.Н. Виноградского  
Российской академии наук



U.S. Space  
& Rocket Center

Joint Institute for Nuclear Research

A.A. Borissyak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences

S.N. Vinogradsky Institute of Microbiology, Russian Academy of Sciences

United States Space and Rocket Center, Huntsville, Alabama, USA

Scientific Council on Astrobiology, Russian Academy of Sciences

# **THE ORGUEIL METEORITE (ATLAS OF MICROFOSSILS)**

**A. Yu. Rozanov, R. B. Hoover, E. A. Krasavin, O. S. Samyilina,**

**A. K. Ryumin, M. I. Kapralov, E. A. Saprykin, A. N. Afanasyieva**

**Moscow 2020**

Объединенный институт ядерных исследований  
Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН  
Институт микробиологии имени С.Н. Виноградского РАН  
Космический и Ракетный Центр Соединенных Штатов, Хантсвилл, Алабама, США  
Научный совет РАН по астробиологии

# **МЕТЕОРИТ ОРГЕЙ (АТЛАС МИКРОФОССИЛИЙ)**

**А.Ю. Розанов, Р.Б. Хувер, Е.А. Красавин, О.С. Самылина,  
А.К. Рюмин, М.И. Капралов, Е.А. Сапрыкин, А.Н. Афанасьева**

**Москва 2020**

ISBN 978-5-903825-42-4  
УДК 552.63:56  
ББК 22.655+28.1

**Метеорит Оргей (атлас микрофоссилий).** А.Ю. Розанов, Р.Б. Хувер, Е.А. Красавин, О.С. Самылина, А.К. Рюмин, М.И. Капралов, Е.А. Сапрыкин, А.Н. Афанасьева. Отв. ред. А.Ю. Розанов - М.: ОИЯИ, 2020. 130 с., 5 ил., 40 фототаблиц. На русском и английском языках.

Работа посвящена результатам детального бактериальнопалеонтологического исследования метеорита Оргей и представляет собой иллюстрированный атлас микрофоссилий (как прокариот, так и эукариот), обнаруженных на свежих внутренних сколах данного метеорита. Представлено более 60 изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа.

ISBN 978-5-903825-42-4

**The Orgueil meteorite (Atlas of microfossils).** A.Yu. Rozanov, R.B. Hoover, E.A. Krasavin, O.S. Samyilina, A.K. Ryumin, M.I. Kapralov, E.A. Saprykin, A.N. Afanasyeva. Red. A.Yu. Rozanov - M.: JINR, 2020. 130 p., 5 il., 40 plates. In Russian and English.

The results of thorough bacterialpaleontological study of the Orgueil meteorite are presented in this illustrated Atlas of microfossils (both prokaryotic and eukaryotic) found within freshly fractured interior surfaces of the meteorite. More than 60 images obtained with Scanning Electron Microscope are presented.

### Рецензенты:

Фронтасьева Марина Владимировна: канд. физ.-мат. наук  
Объединенный институт ядерных исследований,  
Лаборатория нейтронной физики, г. Дубна  
Цельмович Владимир Анатольевич: канд. физ.-мат. наук  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
ГО «Борок» ИФЗ РАН, Лаборатория палеомагнетизма  
и физико-химических свойств горных пород (ОБ-1)

# Содержание

Предисловие	6
I. История падения метеорита Оргей	9
II. Родительское тело метеорита Оргей	11
III. Возраст метеорита Оргей	14
IV. Минеральный состав метеорита Оргей	17
V. Органические соединения в метеорите Оргей	19
VI. История предыдущих исследований микрофоссилий в метеорите Оргей	24
VII. Материал и методы	34
VIII. Описание микрофоссилий в метеорите Оргей	36
Заключение	40
Литература	42
Фототаблицы	49

# Contents

Introduction	6
I. History of the fall of the Orgueil meteorite	9
II. Parent body of the Orgueil meteorite	11
III. Age of the Orgueil meteorite	14
IV. Mineral composition of the Orgueil meteorite	17
V. Organic compounds in the Orgueil meteorite	19
VI. History of the previous studies of microfossils in the Orgueil meteorite	24
VII. Materials and methods	34
VIII. Description of microfossils of the Orgueil meteorite	36
Conclusion	40
References	42
Plates	49



# Предисловие

Во второй половине XX века произошли два очень важных события. Первое – это публикация работ Надя и Клауса, в которых было заявлено об обнаружении в углистых хондритах СП Оргей и Ивуна углеводородных соединений биогенного происхождения (Nagy et al., 1961) и относительно большого количества «микроскопических частиц, напоминающих фоссилизированные водоросли» (Claus, Nagy, 1961). Затем, в самом конце XX столетия, – Дэвид С. Маккей с коллегами сообщили о наличии реликтовой биогенной активности (полициклические ароматические углеводороды и, вероятно, биогенный магнетит и нанофоссилии) в марсианском метеорите ALH84001 (McKay et al., 1996). Параллельно с этим Ричард Б. Хувер в NASA/Marshall Space Flight Center (Хантсвилль) и А. Ю. Розанов, В. М. Горленко и С. И. Жмур из Палеонтологического института РАН (Москва) сообщили об обнаружении микрофоссилий в углистом хондрите Мурчисон (CM2) (Hoover, 1997; Zhmur et al., 1997).

Первые сообщения вызывали довольно резкую негативную реакцию, прежде всего американских астрономов и исследователей метеоритов, не допускавших даже мысли, что следы жизни могут быть обнаружены в метеоритах. Такая реакция захлестнула не только США, но и Россию, где особенно негативная критика исходила от оппонентов, как правило, не имеющих отношения ни к микробиологии, ни к микропалеонтологии. Более чем на двадцать пять лет занятия поисками фоссильных

# Introduction

In the second half of the XX century, two very important events occurred. The first was the report of the discovery of the evidence for biogenic hydrocarbons (Nagy et al., 1961) and relatively large quantities of “microscopic-sized particles, resembling fossil algae” in the Orgueil and Ivuna CI1 carbonaceous meteorites (Claus and Nagy, 1961). Then, near the end of the century, David S. McKay and colleagues reported evidence of relic biogenic activity (PAH’s and possible biogenic magnetite and nanofossils) in the Mars meteorite ALH84001 (McKay et al., 1996). At the same time, Richard B. Hoover at the NASA/Marshall Space Flight Center (Huntsville) and A. Yu. Rozanov, V. M. Gorlenko and S. I. Zhmur at the Paleontological Institute (RAS, Moscow) reported the detection of microfossils in the Murchison CM2 carbonaceous chondrite (Hoover, 1997; Zhmur et al., 1997).

The first reports aroused a rather sharp negative reaction, primarily of American astronomers and meteoriticists, who strongly rejected the possibility that traces of life could be found in meteorites. Such a reaction was observed not only in the USA, but also in Russia, where particularly negative criticism came from astronomers, who generally had little expertise with microbiology, micropaleontology or even meteorites. For more than twenty-five years, the search for fossil remains in meteorites had been considered taboo. Nevertheless, the interest in astrobiology was growing rapidly. This is evidenced by the organization of numerous symposia, meetings and schools in many countries, and by the publication of many conference proceedings volumes, books and journal articles on astrobiology and the



остатков в метеоритах стали считаться неприличными. Тем не менее, интерес к астробиологии стремительно рос. Об этом свидетельствуют организация и проведение в разных странах многочисленных симпозиумов, совещаний и школ, публикация значительного количества тезисов конференций, книг и статей по вопросам астробиологии и учреждение специальной секции «Инструменты, методы и задачи астробиологии» Общества оптики и фотоники SPIE, которая проводит заседания по всему миру, а также учреждение Научного совета по астробиологии при Российской академии наук.

Современный период поиска микрофоссилий в углистом хондрите Оргей (C11) начался в 2004 г. с фрагментов метеорита, любезно предоставленных д-ром Полом Сипьерой (Фонд Планетарных Исследований, Чикаго), д-ром Клодом Перроном и д-ром Мартин Россиньол-Стрик (Национальный музей естественной истории, Париж) (Hoover et al., 2004a,b). За последние 16 лет исследователями США и России были получены тысячи изображений СЭМ и ЭДС анализов минеральных зерен и микрофоссилий *in situ* в Оррее и многих других углистых хондритах. Результаты этого совместного исследования, в форме некоторых отобранных изображений и результатов ЭДС анализа, составляют основу данного Атласа.

В этом ряду событий находится и образование сектора астробиологии в Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ (Дубна). Одной из задач этого сектора стало детальное изучение углистых хондритов на предмет поиска в них фоссильных остатков микроорганизмов. Последнее время основным объектом работы сектора, а также исследовательских групп в NASA/MSFC и ПИН РАН в этом направлении был метеорит Оргей, в котором удалось обнаружить отчетливые и зачастую хорошо сохранившиеся остатки индигенных микроорганизмов. Среди обнаруженных фоссилий встречаются различные остатки фоссилизированных прокариот (нитевидные цианобактерии и актиномицеты), эукариотические микроводоросли (диатомовые, прازیнофиты и акритархи), протисты (хоаноф-

establishment of a Special Section on *Instruments, Methods and Missions for Astrobiology* by SPIE, which holds meetings throughout the world, as well as by the establishment of the Scientific Council on Astrobiology at the Russian Academy of Sciences.

The modern search for microfossils in the Orgueil C11 carbonaceous chondrite began in 2004 using Orgueil samples graciously provided for Scientific Research by Dr. Paul P. Siperia, Planetary Studies Foundation, Chicago; Dr. Claude Perron and Dr. Martine Rossignol-Strick of Musée Nationale d'Histoire Naturelle, Paris (Hoover et al., 2004a,b). During the past 16 years, thousands of high-resolution SEM images and EDS analyses of mineral grains and microfossils *in-situ* in Orgueil and many other carbonaceous meteorites have been obtained during the scientific efforts carried out in the USA and Russia. Selected images and EDS data from this collaborative research effort comprises the body of this *ATLAS*.

As a continuation of this series of events, there is an organization of the Astrobiology sector at the Laboratory of Radiation Biology at JINR (Dubna). One of the primary tasks of this sector became a thorough study of carbonaceous chondrites in order to search for fossil remains of microorganisms within them. Recently, the main object of this study and the continuing work at NASA/MSFC and PIN/RAS was the Orgueil carbonaceous chondrite. This research has revealed the recognizable, and often exceptionally well-preserved remains of indigenous microorganisms. The fossils found include various remnants of fossilized prokaryotes (filamentous cyanobacteria and actinomycetes); aquatic eukaryotic microalgae (e.g., diatoms, prasinophytes and acritarchs); protists (e.g. choanoflagellates, alveolates, and testate amoeba); and possibly even spores of fungi. Scanning Electron Microscopes images and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy data on the element composition of many of these microbial remains are presented in this volume: The Orgueil Meteorite (Atlas of Microfossils).

The authors of the Atlas express their gratitude to Dr. Edmée Ladier (*Le Musée d'Histoire Naturelle Victor Brun*, Montauban); Dr. Martine Rossignol-Strick (*Muséum National d'Histoire Na-*

лагелляты, альвеоляты и раковинные амебы) и, возможно, даже грибные споры. В настоящем Атласе микрофоссилий метеорита Оргей представлены изображения множества микрофоссилий, полученные посредством сканирующей электронной микроскопии, и данные об их элементном составе, полученные посредством ЭДС анализа.

Авторы Атласа выражают благодарность д-ру Э. Ладье (Музей естественной истории Виктора Бруна, Монтобан) д-ру М. Россиньол-Стрик (Национальный музей естественной истории, Париж) и д-ру П. Сипиере (Фонд Планетарных Исследований, Чикаго) за предоставленные образцы Оргея, использованные в ходе исследования; мы также благодарим Г. Джермена и Дж. Костона (NASA/Центр Космических Полетов им. Маршалла), Е. А. Жегалло (ПИН РАН) за предоставленные электронные микроскопы, а также М. В. Фронтасьеву, М. В. Рагульскую, В. Н. Обридко, М. М. Астафьеву и Л. А. Булдашову за плодотворное сотрудничество.

*turelle*. Paris); and Dr. Paul Sipiера (*Planetary Studies Foundation*, Chicago) for providing the Orgueil samples used in this research. We also thank Gregory Jerman and James Coston (*NASA/MSFC*), E. A. Zhegallo (*PIN/RAS*) for Electron Microscopy support; and M. V. Frontasyeva, M. V. Ragulskaya, V. N. Obridko, M. M. Astafyeva and L. A. Buldashova for fruitful cooperation and assistance.

# I. История падения метеорита Оргей

По свидетельствам очевидцев, падение углистого хондрита Оргей (C11) произошло на юго-западе Франции, в 8 часов вечера 14 мая 1864 года. Траектория падения была отмечена тонкой полосой дыма, тянущейся за болидом (Jollois, 1864). Во время падения произошел взрыв болида, обломки которого упали в пределах эллиптического участка (запад-восток) размерами 4x20 км между деревнями Оргей (43°53' N; 01°23' E), Кама, Ноик (департамент Тарн-и-Гаронна) и Фронтон (Верхняя Гаронна), расположенными между Монтобаном и Тулузой (Leymerie, 1864a-d). Основная часть обломков метеорита, равно как и наибольшая его часть, упала около деревни Оргей (43°53' N; 01°23' E), жители которой собрали более 20 фрагментов, представлявших собой черные камни. Многие фрагменты метеорита были покрыты корой плавления, масса некоторых из них превышала 11 кг.

Наблюдения очевидцев из разных мест и время взрыва болида, а также радиус, в котором был виден и слышен взрыв, представлены на **рис. 1а**. Гравюра, изображающая падение метеорита (**рис. 1б**), была опубликована в начале 1865 года в *“L’Annuaire Mathieu de la Drome”* (Gounelle, Zolensky, 2014).

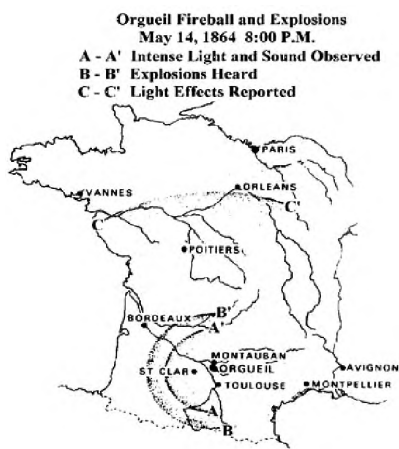
Эти наблюдения позволили Урбену Лавьеру (директору Императорской обсерватории) рассчитать траекторию падения метеорита и высоту (~30 км), на которой произошел взрыв. После взрыва основная часть метеоритной массы продолжала двигаться вдоль первоначальной траектории метеорита (Daubrée, Le Verrier

# I. History of the fall of the Orgueil meteorite

According to reports of eyewitnesses, the Orgueil C11 carbonaceous chondrite fell in southwestern France at 8:00 P.M. on the evening of May 14, 1864. The trajectory of its fall was marked by a thin strip of smoke that extended from behind the fireball (Jollois, 1864). During its fall the Orgueil bolide exploded, and many jet-black stones rained down within a 4 km X 20 km east-west scatter ellipse bounded by the villages of Orgueil (43°53' N; 01°23' E), Campsas, Nohic (Tarn-et-Garonne department) and Fronton (Haute-Garonne) midway between Montauban and Toulouse (Leymerie, 1864a-d). The majority of pieces and the main mass fell near the Orgueil village (43°53' N; 01°23' E). The villagers immediately collected more than 20 of the jet-black stones, (many with complete fusion crusts) with the main mass exceeding 11 kg.

Eyewitness observations of the bolide from different locations and the times when it exploded and the regions where the fireball was seen and thunderous explosions heard are shown in **pic. 1a**. An engraving of the Orgueil meteorite fall (**pic. 1b**) was published in early 1865 in *“L’Annuaire Mathieu de la Drome”* (Gounelle, Zolensky, 2014).

These observations allowed Urbain LeVerrier (Director of the Imperial Observatory) to calculate the trajectory of the meteorite and the altitude (~30 km) at which the explosion occurred. After the explosion, the bulk of the meteorite mass continued to move along the initial trajectory (Daubrée, Le Verrier, 1864; Hoover, 2006b). A white cloud that formed in the atmosphere at the site of explosion of the bolide dissipated after 10–12 minutes.



a



b

Рис. 1. а – карта юго-западной Франции, составленная на основе свидетельств очевидцев: А-А' – интенсивные свет и звук; В-В' – слышны взрывы; С-С' – изменения яркости, связанные с падением Оргея 14 мая 1864 г.; б – гравюра, изображающая падение Оргея, опубликованная в начале 1865 г. в L'Annuaire Mathieu de la Drome (Gounelle, Zolensky, 2014)

Fig. 1. a – a map showing the regions of southern France where witnesses reported observations of: A-A' intense light and sound; B-B' explosions heard & C-C' light effects were observed associated with the Orgueil bolide and meteorite fall on May 14, 1864; b – Engraving of the fall of the Orgueil meteorite published in early 1865 in L'Annuaire Mathieu de la Drome (Gounelle, Zolensky, 2014)

1864; Hoover, 2006b). На месте взрыва болида в атмосфере образовалось белое облако, рассеявшееся спустя 10–12 минут.

О падении незамедлительно сообщили местные газеты, а вскоре фрагменты метеорита и отчеты очевидцев со всего региона были отправлены известному геохимику академику Г. О. Добрэ (куратор коллекции метеоритов в Национальном музее естественной истории, Париж), В. Бруну (директор Музея естественной истории, Монтобан), Ф. Пети (директор Тулузской обсерватории), У. Леверье (директор Парижской обсерватории) (Gounelle, Zolensky, 2014). Сразу стало ясно, что материал Оргея схож с материалом, упавшим ранее в 1806 г. в Алаисе, Франция (Leuymerie, 1864a). Свидетельства очевидцев и результаты первых исследований были опубликованы в начале июня 1864 г. в “Comptes Rendu de L'Academie des Sciences” (Daubrée, 1864a,b) (Cloëz, 1864a,b) (Pisani, 1864), а впоследствии переведены Б. Надем на английский язык в работе “Carbonaceous Meteorites” (Nagy, 1975).

Immediately after the fall, eyewitness reports from across the region appeared in local newspapers and letters and samples for scientific analyses were sent to the eminent Geochemist Academician Gabriel-Auguste Daubrée (curator of the meteorite collection of Muséum National d'Histoire Naturelle in Paris); Victor Brun (Director of the Muséum d'Histoire Naturelle in Montauban); Frederic Petit (Director of the Toulouse Observatory) and Urbain LeVerrier (Director of the Paris Imperial Observatory) (Gounelle, Zolensky, 2014). It was immediately recognized that the Orgueil stones were similar to those that fell in 1806 in Alais, France (Leymerie, 1864a). The eyewitness reports and initial scientific studies of the stones were published in early June, 1864 in “Comptes Rendu de L'Academie des Sciences” by Academician Daubrée (1864a,b) Stanislas Cloëz (1864a,b) and Félix Pisani (1864). These important letters and scientific results were subsequently published in English by Bartholomew Nagy in his volume *Carbonaceous Meteorites* (Nagy, 1975).



## II. Родительское тело метеорита Оргей

В течение очень длительного времени было принято считать, что родительскими телами метеоритов являются астероиды, происходящие или из астероидного пояса, или из облака Оорта. И хотя подобное представление справедливо для большинства каменных хондритов, ахондритов и железных метеоритов, недавние исследования позволяют предположить, что Оргей, Мурчисон и другие углистые хондриты типов CI и CM могут иметь кометное происхождение (Ehrenfreund et al., 2001; Sephton, 2002; Peeters et al., 2003; McKeegan et al., 2006; Hoover, 2006a, 2011, 2014; Zolensky et al., 2008; Nesvornyy et al., 2010; Gounelle, 2011; Glavin et al., 2018; Wickramasinghe et al., 2012, 2018).

Для расчета орбиты и траектории прохождения метеороида Оргей через земную атмосферу были использованы свидетельства очевидцев, упоминавшиеся в корреспонденции 1864 года и научных отчетах того времени (Gounelle et al., 2006). Расчеты показали, что плоскость орбиты близка к эклиптике, афелий равен 5,2 а.е. (большая полуось Юпитера) и перигелий равен 0,87 а.е. (внутри орбиты Земли). Подобные параметры орбиты позволяют предположить, что наиболее вероятным родительским телом Оргея являлся объект, принадлежавший к астероидной группе Аполлонов или к кометам семейства Юпитера (JFC), хотя также не следует исключать кометы галлеевского типа, для которых характерны орбиты средних размеров, сильно наклоненные к плоскости эклиптики Солнечной системы.

## II. Parent body of the Orgueil meteorite

For a very long time, the widely accepted paradigm has been that meteorites are asteroidal in nature and arose from the asteroid belt or the Oort cloud. While this interpretation is valid for the majority of the Stony Chondrites, Achondrites, and Iron meteorites, more recent studies indicate that Orgueil, Murchison and other CI and CM carbonaceous chondrites may be of cometary origin (Ehrenfreund et al., 2001; Sephton, 2002; Peeters et al., 2003; McKeegan et al., 2006; Hoover, 2006a, 2011, 2014; Zolensky et al., 2008; Nesvornyy et al., 2010; Gounelle, 2011; Glavin et al., 2018; Wickramasinghe et al., 2012, 2018).

Eyewitness accounts contained within the 1864 letters and scientific reports were used to compute the atmospheric trajectory and orbit of the Orgueil meteoroid (Gounelle et al., 2006). The orbital plane was found to be close to the ecliptic; aphelion 5.2 AU (the semi-major axis of the orbit of Jupiter) and perihelion 0.87 AU, (just inside the Earth's orbit). These orbital parameters indicated the most likely parent body for the Orgueil meteorite is a member of the Apollo Asteroids or Jupiter-Family comets (JFC), but the data does not exclude the Halley-type comets (medium length orbit, highly inclined to the ecliptic plane of the solar system).

It has also been known since 1864 that Orgueil contains indigenous extraterrestrial water and carbon. The stone is made of mineral grains cemented together by magnesium sulfate and other water soluble salts. The mineralogy and absence of chondrules in the Orgueil meteorite provides direct evidence for periods of aqueous alteration

Уже с 1864 года было известно, что Оргей содержит воду и углерод, присутствовавшие в его теле изначально и имеющие внеземное происхождение. Сам метеорит состоит из минеральных зерен, сцементированных сульфатом магния и другими водорастворимыми солями. Подобная минералогия и отсутствие хондр указывают на то, что родительское тело метеорита испытывало длительное воздействие жидкой воды еще задолго до вхождения метеорита в земную атмосферу. Воздействие воды на тела Оргея, Ивуны и других углистых хондритов типа CI подтверждается отсутствием в них хондр и глинистых минералов, присутствием в них слоистых силикатов, а также другими данными по их минеральному, химическому и изотопному составу (Aponte et al., 2015; Bass, 1971; Boström, Frederickson, 1966; Endress, Bischoff, 1993, 1996; Ehrenfreund et al., 2001; Kerridge et al., 1979; Frederickson, Kerridge, 1988; Glavin et al., 2018).

Данные по химическому и изотопному составу минералов, соотношение D/H и присутствие внеземных аминокислот и нуклеиновых оснований указывают на то, что кометы могут являться наиболее вероятными родительскими телами Оргея, Ивуны, других углистых хондритов и антарктических микрометеоритов (Ehrenfreund et al., 2001; Robert et al., 2000; Hoover et al., 1986a,b; Hoover, 2006a,b; Gounelle et al., 2006, 2008; Hartogh et al., 2011). Представление о кометном происхождении Оргея было в значительной мере подкреплено обнаружением схожих минералов и хондроподобных объектов в частицах кометы 81P/Wild 2, доставленных на Землю в результате миссии Stardust (Nakamura et al., 2008). Недавние наблюдения выявили схожесть отношения D/H внеземной индигенной воды Оргея с водой кометы 103/P Hartley 2, что также свидетельствует в пользу кометного происхождения Оргея.

Обнаружение в одном из фрагментов Оргея фоссилизированной формы, идентифицированной как магнитотактическая бактерия (см. главу VI, рис. 4) (Tan, VanLandingham, 1967), указывает на то, что некоторая часть родительского тела метеорита представляла собой материал, до аккрецирования принадлежавший кос-

by liquid water on the parent body long before the stones entered into the Earth's atmosphere. The extensive aqueous alteration of Orgueil, Ivuna and other CI carbonaceous meteorites is evidenced by their lack of chondrules and the presence of phyllosilicates, clay minerals and other mineralogical, chemical and isotopic data (Aponte et al., 2015; Bass, 1971; Boström, Frederickson, 1966; Endress, Bischoff, 1993, 1996; Ehrenfreund et al., 2001; Kerridge et al., 1979; Frederickson, Kerridge, 1988; Glavin et al., 2018).

Chemical and isotopic studies of the minerals, D/H ratios and extraterrestrial amino acids and nucleobases provided early evidence that comets might represent the parent bodies of Orgueil, Ivuna, other carbonaceous chondrites and Antarctic micrometeorites (Ehrenfreund et al., 2001; Robert et al., 2000; Hoover et al., 1986a,b; Hoover, 2006a,b; Gounelle et al., 2006, 2008; Hartogh et al., 2011). The comet model for the Orgueil parent body has been greatly strengthened by the discovery of similar minerals and chondrule-like objects in particles of comet 81P/Wild 2 returned to Earth by the Stardust mission (Nakamura et al., 2008). Recent observations of the similarity of the D/H ratio of the indigenous extraterrestrial water in the Orgueil meteorite to the water of comet 103/P Hartley 2 provides additional observational evidence that the Orgueil parent body was a comet.

The discovery of a fossilized form in one the Orgueil's fragments, which was indentified as a magnetotactic bacterium (see chapter VI, pic. 4) (Tan, VanLandingham, 1967), indicates that some part of the meteorite's parent body, before its accretion, used to belong to a cosmic body possessing a magnetosphere, hydrosphere and possibly atmosphere.

It is now generally accepted that comets played a major role in the delivery of water and organics to the early Earth. The panspermia hypothesis proposes the interplanetary transfer of life (Arrhenius, 1908). Long-term experiments on the survival of organics and bacteria in outer space have been carried out by NASA ROSCOSMOS, ESA and JAXA. These include the the LDEF, BIOPAN, ADAPT, EXPOSE and TANPOPO experiments on

мическому телу, обладавшему магнитосферой, гидросферой и, возможно, атмосферой.

Сейчас считается общепризнанным, что кометы сыграли важную роль в доставке воды и органических веществ на раннюю Землю. Гипотеза панспермии предполагает межпланетный перенос жизни (Arrhenius, 1908). NASA, Роскосмос, ЕКА и JAXA провели долгосрочные эксперименты по выживанию органических соединений и бактерий в космическом пространстве. К ним относятся эксперименты LDEF, BIOPAN, ADAPT, EXPOSE и TANPOPO на борту аппаратов Skylab, Мир, Spacelab, Фотон и Международной космической станции (Kawaguchi et al., 2020). По данным этих экспериментов многие прокариотические и эукариотические микроорганизмы годами выживают в условиях глубокого космоса, защищенные многослойным агрегатом клеток толщиной всего несколько тысяч мкм (Horneck et al., 1994; Wickramasinghe et al., 2018; Kawaguchi et al., 2020). Расчеты показывают, что в условиях литиопанспермии (под защитой всего нескольких метров горных пород или льда) выживаемость бактерий и спор увеличивается до многих миллионов лет (Worth et al., 2018; Mileikowsky et al., 2000). Э. М. Галимов вычислил биологические и термодинамические факторы изотопного фракционирования аминокислот в живых организмах и углистых хондритах и обнаружил, что, хотя аминокислоты в метеоритах явно внеземные, существует «замечательная взаимосвязь между этими параметрами – взаимосвязь, аналогичная взаимосвязи между биологическими соединениями» (Galimov, 1985). Эти данные подтверждают возможность переноса бактерий между планетами, лунами, астероидами и кометами нашей Солнечной системы через космическое пространство.

board Skylab, Mir, Spacelab, Foton and the International Space Station (Kawaguchi et al., 2020). These experiments established the many prokaryotic and eukaryotic microbes survive for years in the environment of deep space protected by multilayer aggregates of cells only few thousand  $\mu\text{m}$  thick (Horneck et al., 1994; Wickramasinghe et al., 2018; Kawaguchi et al., 2020). Calculations show that under lithiopanspermia conditions (protected by only a few meters of rock or ice) the survivability of bacteria and spores increases to many millions of years (Worth et al., 2018; Mileikowsky et al., 2000). E. M. Galimov computed the biological and thermodynamic isotopic fractionation factors of amino acids in living organisms and carbonaceous meteorites and found that while the meteorite amino acids were clearly extraterrestrial there was “a remarkable relationship between these parameters—a relationship analogous to that of biological compounds.” (Galimov, 1985). These data confirm the possibility of bacteria transfer between planets, moons, asteroids and comets of our Solar System through outer space.



### III. Возраст метеорита Оргей

Углистый хондрит Оргей (CII) является одним из наиболее древних и примитивных метеоритов из числа известных нам. Углистые хондриты представляют собой продукты процессов, начавшихся после коллапса газопылевого облака, приведшего к формированию Солнечной системы. Как правило, углистые хондриты содержат богатые кальцием и алюминием вкрапления, а также хондры, представляющие собой сферические образования диаметром от микрона до сантиметра, образованные, как считается, в результате стремительного остывания капель расплавленной пыли в протопланетном диске. К сегодняшнему дню обнаружено лишь 9 углистых хондритов CII, и они считаются наиболее примитивными из всех метеоритов, поскольку их элементный состав (за исключением летучих веществ) наиболее близок к составу фотосферы Солнца. Падения 5 из 9 углистых хондритов типа CII (Алаис, 1806; Оргей, 1864; Тонк, 1911; Ивуна, 1938 и Ревелсток, 1965) были зафиксированы. Другие четыре (Y-86029; Y-86737; Y-980115; Y-980134) были обнаружены во льдах гор Ямато во время экспедиций в Антарктиду в 1986 и 1998 годах (Hoover, 2011). И хотя углистые хондриты типа CII не содержат ни хондр, ни кальциево-алюминиевых вкраплений, согласованность между собой данных как по абсолютной, так и по относительной хронологии CV3 углистого метеорита Алленде, полученных на основе соотношений изотопов  $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$  и  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ , позволили датировать коллапс протозвездного облака 4,5675 млрд. лет назад, после чего достаточно быстро начались процес-

### III. Age of the Orgueil meteorite

The Orgueil meteorite is a CII carbonaceous chondrite. It is one of the oldest and most primitive of all known meteorites. Carbonaceous chondrites are remnants of the processes that resulted when the cloud of interstellar gas and dust of the proto-solar nebula collapsed to form our Solar System. Carbonaceous chondrites typically contain calcium-aluminum-rich inclusions (CAI's) and chondrules, which are micron to centimeter sized spheres of rock that formed from molten droplets cooling quickly in the condensing nebular cloud of the proto-solar disk. There are only 9 CII carbonaceous chondrites known and they are considered the most primitive of all meteorites as their element compositions (except for volatiles) closely match that of the photosphere of the Sun. Five of the CII carbonaceous chondrites (Alais, 1806; Orgueil, 1864; Tonk, 1911; Ivuna, 1938 and Revelstoke, 1965) were observed falls. The other four (Y-86029; Y-86737; Y-980115; Y-980134) were found in the ice of the Yamato Mountains during Expeditions to Antarctica in 1986 & 1998 (Hoover, 2011). Although the CII carbonaceous chondrites contain neither chondrules nor CAI's, the agreement of the absolute and relative chronology data from measurement of the  $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$  isochron and the  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  system of the chondrules and CAI's of the Allende CV3 carbonaceous meteorite suggests the collapse of the proto-solar nebula forming the solar system took place 4.5675 billion years ago and the solidification of the Earth, moon and other planets occurred shortly thereafter (Connelly et al., 2008).

Boström and Frederickson (Boström, Frederickson, 1966) described the Orgueil meteorite as bituminous clay with a breccia structure and clastic

сы формирования Земли, Луны и других планет (Connelly et al., 2008).

Бострём и Фредериксон (Boström, Frederickson, 1966) описали Оргей как битумную глину с брекчиевой структурой и кластической текстурой, а также определили три основные стадии формирования минералов родительского тела Оргея:

1. Ранняя горячая фаза формирования минералов, таких как троилит, стабильных при нескольких сотнях °C.
2. Средняя фаза, во время которой при температуре <170 °C происходило формирование таких минералов как хлорит и лимонит.
3. Поздняя стадия формирования карбонатов и сульфатов при температуре <50 °C.

Принято считать, что Оргей представляет собой микрореголитовую брекчию, минеральный состав которой дает однозначные и убедительные доказательства воздействия воды на родительское тело метеорита, в результате которого, вероятно, были разрушены изначально присутствовавшие в нем хондры (Aponte et al., 2015; Enders, Bischoff, 1993, 1996; Bunch, Chang, 1980; Fredriksson, Kerridge, 1988).

Структура Оргея, как и других углистых хондритов типа C11, очень рыхлая и неоднородная. Более того, в одном и том же фрагменте метеорита, в масштабах от микрона до нескольких миллиметров, могут обнаруживаться разнообразные минеральные частицы, жилы и углистые тела разных возрастов и происхождения. Столь высокая степень неоднородности делает невозможным однозначное определение возраста метеорита Оргей.

Корунд и зерна карбида кремния были обнаружены в углистых хондритах Оргей, Алленде и Мурчисон (Huss et al., 1982). Исследования изотопов тяжелых элементов показали, что многие из зерен SiC были сформированы в ходе медленного процесса захвата нейтронов (s-процесс), который, в основном, протекает в звездах асимптотической ветви гигантов (AGB) и древних красных гигантах, в то время как зерна SiC типа X сформировались, скорее всего, в сверхновых (Hoyle, 1946; Burbidge et al., 1957; McSween and Huss, 2010; Nguyen, Messenger 2011; Heck et al., 2020). Более 52 тыс. звезд из базы данных KEPLER APOGEE DR были проанализированы с учетом отношения C/N и мо-

texture with three main stages of mineral formation on the Orgueil parent body:

1. Early hot stage forming minerals like troilite stable at several hundred °C
2. Middle stage with minerals like chlorite and limonite formed <170 °C
3. Late stage carbonates and sulphates formed <50 °C

It is generally accepted that the Orgueil meteorite is a microregolith breccia with a mineral composition that provides evidence of extensive aqueous alteration on the parent body which probably destroyed the chondrules that were originally present (Aponte et al., 2015; Enders, Bischoff, 1993, 1996; Bunch, Chang, 1980; Fredriksson, Kerridge, 1988).

The Orgueil meteorite, like all other C11 carbonaceous meteorites, is extremely friable and heterogeneous. Profound variations in chemistry, morphology, mineralogy and texture can occur from one Orgueil fragment to the next. Furthermore, at the micron to mm scale distances many diverse mineral particulates, veins, and carbonaceous bodies of different ages and origins exist within the same stone fragment. This great heterogeneity precludes assessment of «the age» of the Orgueil meteorite stones.

Corundum and silicon carbide grains have been found in the Orgueil, Allende and Murchison carbonaceous chondrites (Huss et al., 1982). Heavy element isotopic studies have established that many of the SiC grains were S-process nucleosynthesis that occurs mainly in Asymptotic Giant Branch (AGB) stars and ancient Red Giants, whereas the SiC type X grains probably were formed in supernovae (Hoyle, 1946; Burbidge et al., 1957; McSween and Huss, 2010; Nguyen, Messenger 2011; Heck et al., 2020). Application of C/N abundances and stellar evolution models to 52,000 stars in the KEPLER APOGEE DR12 survey database resulted in age determinations for these stars over a very broad range – up to 13 Gyr. Therefore, the grains that have remained frozen in the primitive interior core of the Orgueil C11 meteorite are likely to be ancient presolar (4.567 to 13 Gyr) interstellar and intergalactic

делей звездной эволюции с целью определения их возрастов, которые, как выяснилось, значительно варьируются вплоть до 13 млрд. лет. Как следствие, можно сделать осторожный вывод, что зерна, оставшиеся замороженными в примитивном внутреннем ядре Оргея, скорее всего, являются древними досолнечными (от 4,567 до 13 млрд. лет) частицами межзвездной и межгалактической космической пыли, конденсация которых, вместе с водным льдом и другими летучими веществами, привела к формированию родительского тела метеорита Оргей. Однако те зерна, что содержатся во льдах около внешних слоев родительского тела, могли попасть туда в результате аккреции из множества потенциальных источников, таких как межгалактическая, межзвездная, зодиакальная, околопланетная и межпланетная космическая пыль, каменные, органические частицы, водные и ледяные частицы ледяных лун и комет. Принимая во внимание доказательства в пользу того, что Оргей представляет собой микрореголитовую брекчию, в основном составленную из микроскопических частиц, значительно различающихся между собой по возрасту и происхождению, лучше всего рассматривать его как древний примитивный метеорит, большая часть твердых компонентов которого представляет собой вещество, выброшенное звездами и сверхновыми в период, предшествовавший формированию протосолнечной туманности, последующая конденсация которой привела к формированию Солнца, планет, лун и других малых тел Солнечной системы.

В заключение можно сказать, что раз древняя межгалактическая и межпланетная пыль и вещество, выброшенное сверхновыми, никогда не подвергались процессу плавления, то они и являются собой ту древнюю космическую пыль, которая впоследствии была включена в состав примитивных льдов, сформировавших микрореголитовую брекчию Оргея.

Поскольку метеорит Оргей состоит как из частиц древней межзвездной пыли, так и из частиц более молодой звездной и межпланетной космической пыли, планетных выбросов, льда, органики и кометного мусора, аккрецированного до входа метеорита в атмосферу Земли в 1864 году, то невозможно выделить какой-то однозначный момент формирования метеорита Оргей.

dust that condensed along with frozen water and other volatiles into the meteorite parent body. However, those contained within ices near the crust of the parent body may have been accreted from a wide variety of sources: including intergalactic dust; interstellar dust, zodiacal dust, circumplanetary dust, interplanetary dust particles (IDP's), rocky and organic grains and water and icy particles expelled from icy moons and comets. In consideration of the evidence that the Orgueil CII carbonaceous meteorite is a microregolith breccia that is most probably comprised of microscopic particulates from a great diversity of sources of widely diverse ages, it may be considered an ancient primitive meteorite, with much of its solid components ejected from stars and supernovae prior to the formation of the proto-solar nebula that condensed to produce the Sun, planets, moons and other small bodies of our Solar System.

In summary, since the ancient intergalactic and interstellar dust and supernovae particulates never experienced the melt phase, they represent an assemblage of ancient stardust particulates that were incorporated into the primitive ices that became the Orgueil microregolith breccia.

Since the Orgueil meteorite is composed of ancient pre-solar grains and interstellar dust along with younger stardust and interplanetary cosmic dust particles, planetary ejecta, ices, organics and cometary debris accreted prior to the 1864 entry of the stones into the atmosphere of Earth, it is not possible to ascribe a single discrete age of formation to the Orgueil meteorite.

## IV. Минеральный состав метеорита Оргей

Первые химические анализы состава Оргея показали высокое содержание углерода и органических веществ, и что матрикс на 8–10% состоит из водосодержащих минералов. Также было обнаружено наличие солей аммония и магния, ангидрита, кальцита, серпентина, пирротина, треворита, присутствие кремниевой кислоты и сложного полимерного углеродного вещества, не растворимого в воде и схожего с гуминовыми веществами, такими как торф и уголь (Cloëz, 1864a,b; Pisani, 1864; Hoover, 2006b). Клоэз также отметил, что фрагменты легко распадаются при взаимодействии с водой, которая растворяет соли, связывающие зерна минералов с частицами микрореолитной брекчии Оргея.

Более поздние исследования минералогии Оргея (Boström, Fredriksson, 1966; DuFresne, Anders, 1962) показали, что основные минералы, входящие в его состав – это: хлорит (62,6%), эпсомит (6,7%), магнетит (6%), троилит (4,6%), гипс (2,9%), графит (2,9%), брейнерит (2,8%), самородная сера (1,7%), мерриллит (0,8%), сульфат натрия (0,6%), лимонит (0,5%), фосфат кальция. Более подробно химический и минеральный состав Оргея рассмотрены в работах: Cloëz, 1864a,b; DuFresne, Anders 1962; Boström, Fredriksson, 1966; Tomeoka, Buseck, 1988 (таблица 1).

Матрикс образует смесь двух материалов: богатых магнием слоистых силикатов и богатую железом фазу, содержащую никель и серу (ферригидрит) (Tomeoka, Buseck, 1988). Кроме того, в состав матрикса входят крошечные зерна оливина, пироксена, элементарного железа, карбида кремния, графита и нерастворимого полимерного органического вещества, сходного с углем или керогеном (Boström, Fredriksson, 1966).

## IV. Mineral composition of the Orgueil meteorite

The initial chemical analysis of the Orgueil meteorite revealed it to be rich in carbon and organics and to contain 8–10% extraterrestrial water in the matrix. It was also found to contain ammonium and magnesium salts, anhydrite, calcite, serpentine, pyrrhotite, trevorite; silic acid and a complex polymeric carbonaceous material that is insoluble in water and similar to humic substances, such as peat and coal (Cloëz, 1864a,b; Pisani, 1864; Hoover, 2006b). Cloëz also noted that the stones are easily disintegrated in water which dissolves the salts that cement together the mineral grains and particulates of the Orgueil microregolith breccia. Ammonium chloride and some of the other salts and volatile compounds initially detected are no longer present in the meteorite.

More recent data on the mineralogy of the Orgueil meteorite (Boström, Fredriksson, 1966; DuFresne, Anders, 1962), reported that the main minerals Orgueil contains were: chlorite (62.6%), epsomite (6.7%), magnetite (6%), troilite (4.6%), gypsum (2.9%), graphite (2.9%), Breunnerite (2.8%), native sulfur (1.7%), Merrillite (0.8%), sodium sulfate (0.6%), limonite (0.5%) and calcium phosphate. More detailed data on the chemical and mineral composition of the Orgueil carbonaceous chondrite can be found in the aforementioned works: Cloëz, 1864a,b; DuFresne, Anders, 1962; Boström, Fredriksson, 1966; Tomeoka, Buseck, 1988 (table 1).

The matrix is formed by a mixture of two materials: magnesium-rich phyllosilicates and iron-rich phase containing nickel and sulphur (ferrihydrite) (Tomeoka, Buseck, 1988). Moreover, the matrix contains tiny grains of olivine, pyroxene, elemental iron, graphites and silicon carbide grains and polymeric insoluble organic matter similar to coal or kerogen (Boström, Fredriksson, 1966).

Таблица 1 / Table 1		
Минерал / Mineral	Химический состав / Chemical composition	Масса, % / Mass, %
Ангидрит / Anhydrite	$\text{CaSO}_4$	~
Брейнерит / Breunnerite	$(\text{Fe}, \text{Mg})\text{CO}_3$	2,8
Хлорит / Chlorite	$X_n(\text{Y}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ , $X = \text{Mg} + \text{Al}, \text{Fe}, \text{Cr or Mn};$ $Y = \text{Si} + \text{Al}$	62,6
Доломит / Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	~
Гипс / Gypsum	$\text{CaSO}_4 * 2\text{H}_2\text{O}$	2,9
Лимонит / Limonite	$\text{Fe}_2\text{O}_3 * n\text{H}_2\text{O}$	0,5
Магнетит / Magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	6,0
Мерриллит / Merrillite	$\text{Na}_2\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{O}$	~
Витлокит / Whitlockite	$\text{Ca}_9\text{MgH}(\text{PO}_4)_7$	~
Оливин / Olivine	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$	~
Пироксен / Pyroxene	Mg, Fe, Ca, etc. $\text{SiO}_3$ silicates	~
Пирротин / Pyrrhotite	$(\text{Fe}, \text{Ni})_{0,9}\text{S}$	~
Серпентин / Serpentine	$\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	~
Шамозит / Chamosite	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_5 \text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	~
Кронштедтит / Cronstedtite	$\text{Fe}_2^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{SiFe}^{3+})\text{O}_5(\text{OH})_4$	~
Элементарная сера / Elemental sulfur	S	~
Треворит / Trevorite	$\text{NiFe}_2\text{O}_4$	~
Троилит / Troilite	FeS	4,6
Эпсомит / Epsomite	$\text{MgSO}_4 * 7\text{H}_2\text{O}$	6,7
Графит / Graphite	C	~
Сульфат натрия / Sodium sulphate	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,6
Гидроксид железа / Iron hydroxide	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	~
Фосфат кальция / Calcium phosphate	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	0,8
Кремниевая кислота / Silica acid	$n\text{SiO}_2 * m\text{H}_2\text{O}$	~



## V. Органические соединения в метеорите Оргей

Спустя всего месяц после падения метеорита выдающийся химик Ф. С. Клоэз исследовал углеводородные соединения Оргея и обнаружил, что их химический состав (углерод 63,45%, водород 5,98%, кислород 30,57 %) отличается от такового для живых организмов и близок к бурому углю, торфу и гуминовым веществам (Cloëz, 1864a,b).

В 1868 г. академик М. Бертелло провел ряд экспериментов с целью изучения органических соединений метеорита. Он провел гидрирование фрагментов метеорита и обнаружил углеводороды с общей формулой  $C_2H_{2n+2}$ ; аналогичные земным углеводородам биогенного происхождения, обнаруживаемым в составе нефти (Berthelot, 1868).

К настоящему времени известно, что органические вещества составляют примерно 13,9% от общей массы метеорита Оргей. В углистых хондритах типов CI1 и CM2 порядка 90–95% всех органических веществ представлены веществом полимерного типа с длинными молекулярными цепочками и нерастворимым в обычных растворителях. Надь (Nagy, 1975) исследовал данное нерастворимое органическое вещество и обнаружил, что оно схоже с керогеном (расчетный состав  $C_{100}H_{70}N_3O_{12}S_2$ ) и индигенно для метеорита (Hayatsu et al., 1977). Кероген является хорошо известным и важным биомаркером.

Исследования, проведенные после начала 1960-х гг., показали присутствие в Оргее, Мурчисоне и других углистых хондритах множество растворимых органических соединений и биомолекул, в том числе алифатических и аро-

## V. Organic compounds in the Orgueil meteorite

Only one month after the fall, the eminent chemist Felix S. Cloëz studied the hydrocarbons of the Orgueil meteorite and discovered that their chemical composition (carbon 63.45%, hydrogen 5.98%, oxygen 30.57%) is different from living organisms but very similar to lignite coal, peat and humic substances (Cloëz, 1864a,b).

In 1868, Academician Marcellin Berthelot performed a number of experiments to study organic compounds in the Orgueil meteorite. Berthelot used the chemical reaction of hydrogenation and discovered hydrocarbons with the general formula  $C_2H_{2n+2}$  in the Orgueil meteorite similar to terrestrial hydrocarbons found in petroleum that are of biological origin (Berthelot, 1868).

It is now known that organic compounds comprise about 13.9% of the total mass of the Orgueil meteorite. About 90–95% of all organic compounds found in CI1 and CM2 carbonaceous chondrites are represented by long chain polymers insoluble in common solvents. Nagy (1975) studied this insoluble organic matter (IOM) and came to the conclusion that this complex organic polymer was similar to kerogen (estimated composition  $C_{100}H_{70}N_3O_{12}S_2$ ) and indigenous to the meteorite (Hayatsu et al., 1977). Kerogen is a very well-known biogeochemical biomarker.

Extensive studies conducted since the early 1960's have shown that Orgueil, Murchison and other carbonaceous meteorites contain a host of soluble organics and biomolecules including: aliphatic and aromatic hydrocarbons, nucleic acid bases, sugar alcohols, hydroxy acids, carboxylic acids, and amino acids (Nagy, 1975; Cooper et

матических углеводов, азотистых оснований, альдитов, оксикислот, карбоновых кислот и аминокислот (Nagy, 1975; Cooper et al., 2001; Sephton, 2002; Schmitt-Kopplin, 2010; Glavin et al., 2018). Некоторые из этих биомаркеров являются «слабыми» – то есть образующимися как в результате биогенных, так и абиогенных процессов. Помимо этого, в Орее также обнаружен ряд «сильных» биомаркеров, таких как хиральные  $\alpha$ -аминокислоты, азотистые основания и продукты диагенетического распада хлорофилла (порфирины, пристан, фитан). Эти биомаркеры являются необходимыми для жизни, формируются в результате лишь биогенных механизмов, и способны сохранять свою химическую структуру на протяжении значительных периодов времени (~ от миллионов до миллиардов лет). Диагенетические и катагенетические процессы, изменяющие первоначальные биохимические вещества, приводят лишь к утрате функциональных групп (-OH, -COOH и т.д.), что практически не влияет на узнаваемость этих древних химических фоссилий (Kaplan et al., 1963; Peters, Moldowan, 1993). Некоторые «слабые» и «сильные» биомаркеры, которые присутствуют в метеорите Оргей, представлены в **таблице 2**.

Киссин (Kissin, 2003) исследовал метеорит Оргей с применением ИК-спектроскопии и газовой хроматографии и обнаружил в нем изопреноидные углеводороды C19 (пристан) и C20 (фитан). В настоящее время не известно ни одного абиогенного механизма формирования хлорофилла, равно как и для пристана и фитана, формирующихся в ходе сложных реакций при участии ферментов.

Среди хиральных молекул в земной биосфере преобладают L-аминокислоты и D-сахара. В живых (и недавно умерших) клетках все аминокислоты в белках являются левозакрученными, а сахара (рибоза и дезоксирибоза) во всех молекулах РНК и ДНК представлены исключительно правозакрученными молекулами. Аминокислоты, синтезированные в результате абиотических процессов рацематны, т. е. L- и D-молекулы в них представлены в равном соотношении (D/L=1).

al., 2001; Sephton, 2002; Schmitt-Kopplin, 2010; Glavin et al., 2018). Some of these biomarkers are “weak” – although they are produced by living organisms they can also be formed by abiotic mechanisms. The Orgueil meteorite also contains many “strong” biomarkers, such chiral  $\alpha$ -amino acids, nucleobases and the diagenetic breakdown products of chlorophyll (porphyrins, pristane and phytane). These biomarkers are critical to life and not formed by abiotic mechanisms. They are also known to be able to retain their chemical structure over significant amounts of time (~millions to billions of years). The diagenetic and catagenetic processes that alter their original biochemical substances lead only to the loss of functional groups (-OH, -COOH, etc.) after which these ancient chemical fossils are still easily recognizable (Kaplan et al., 1963; Peters, Moldowan, 1993). Some of the «weak» and «strong» biomarkers that are present in the Orgueil meteorite are shown in **table 2**.

Kissin (2003) examined the Orgueil meteorite with IR spectroscopy and gas chromatographic methods and detected C19 (pristane) and C20 (phytane) isoprenoid hydrocarbons, which are derived as a biogeochemical breakdown products of the phytol chain of chlorophyll. No mechanism has ever been discovered for the abiological production of chlorophyll or Pristane and Phytane, which are formed by a large suite of complex enzyme-assisted reactions.

The *L*-amino acids and the *D*-sugars overwhelmingly dominate the distribution of chiral biomolecules in the terrestrial biosphere. In living (or recently dead) cells, all amino acids in proteins are *L*-amino acids and the sugars (ribose and deoxyribose) in all RNA and DNA molecules are exclusively *D*-sugars. On the other hand, amino acids produced by abiotic processes are racemic mixtures of equal amounts of the *L*- and *D*-enantiomers (D/L=1).

After an organism dies, the amino acids begin to racemize at a rate, which is dependent upon the temperature, environmental conditions, and the stability of the particular amino acid. This process occurs over geological rather than historical time scales to eventually yield a racemic (D/L=1)



<b>Таблица 2 / Table 2</b>		
<b>«Слабые» биомаркеры</b>	<b>“Weak” Biomarkers</b>	<b>Источник / Reference</b>
Мочевина, ацетомид и ароматические кислоты	Urea, acetomide and aromatic acids	Briggs, 1963
Полициклические ароматические углеводороды	Polycyclic aromatic hydrocarbons	Commins & Harrington, 1966
Нормальные и изопреноидные алканы	Normal and isoprenoid alkanes	Oró & Gelpi, 1968; Gelpi & Oró, 1970
Длинноцепочечные жирные кислоты (древние морские отложения)	Long chain fatty acids~ancient marine sediments)	Meinschein, Nagy, & Hennessy, 1963; Nagy & Bitz, 1963
Алифатические углеводороды	Aliphatic hydrocarbons	Nooner & Oró, 1967
«Организованные элементы»	“Organized Elements”	Claus & Nagy, 1961; Claus, G., Nagy, B., Europa, D. L., 1963; Nagy, 1975
Рацематные аминокислоты	Racemic Amino Acids	Kaplan et al. (1963), Vallentyne (1965); Nagy & Bitz (1963); Botan, 1965
<b>«Сильные» биомаркеры</b>	<b>“Strong” Biomarkers</b>	<b>Источник / Reference</b>
Органическое вещество (гумус, торф и бурый уголь)	Organic matter (humus, peat and lignite coal)	Daubrée, 1864a; Cloez, 864a,b; Pisani, 1864; Bass, 1971
Полимероподобные углеводороды; нерастворимое органическое вещество (кероген)	Polymer-like hydrocarbons; IOM ~ Kerogen	Berthelot, 1868; Bitz & Nagy, 1966; Olson et al., 1967; Nooner & Oró, 1967; Nagy (1975); Cronin, Pizzarello & Frye, 1987
Насыщенные углеводороды ~ морские отложения)	Saturated hydrocarbons ~ marine sediments	Meinschein et al., 1963
Ванадил порфирины, пигменты ~ древние земные отложения: фитан, пристан и норпристан	Vanadyl Porphyrins, pigments~ancient terrestrial sediments; Pristane, Phytane and NorPristane	Kaplan, Degens & Reuter, 1963; Hodgson & Baker, 1964, 1969; Oró et al., 1966; Urey, 1966; Oro & Gelpi, 1969; Nagy, 1975; Kissin, 2003
Протеиногенные аминокислоты с избытком L-энантиомера	Protein Amino Acids with L-Enantiomer Excess	Nagy et al., 1964; Engel et al.; Cronin & Pizzarello 1997; Ehrenfreund et al., 2001
Биологическое фракционирование изотопов углерода в аминокислотах внеземных белков	Biological Fractionation of Carbon Isotopes in Extraterrestrial Protein Amino Acids	Nier, Gulbransen, 1939; Chang et al., 1978; Galimov, 1985
Микрофоссилии с линейной цепочкой магнитосом ~ магнитотактические бактерии	Microfossils with linear chain of magnetosomes ~ magnetotactic bacteria	VanLandingham, 1967; Hoover, Rozanov, 2001
Внеземные сахара: рибоза, арабиноза, ксилоза, ликсоза	Extraterrestrial Sugars: Ribose, Arabinose, Xylose, Lyxose	Furukawa et al., 2019

После смерти организма аминокислоты начинают рацемизоваться. Скорость данного процесса определяется температурой, внешними условиями и стабильностью конкретного типа аминокислоты. Процесс формирования рацематного раствора ( $D/L=1$ ) проходит на протяжении не исторически, но геологически значимых промежутков времени (Mitterer, 1993). Медленное изменение  $D/L$  может быть использовано для определения времени, прошедшего с момента гибели организма (Bada, 1971; Kvenvolden, Blunt and Clifton, 1979; Kaufman and Miller, 1992; Cann and Murray-Wallace, 1986).

Многие протеиногенные аминокислоты, а также ряд аминокислот, не имеющих известной функции в земной биологии, были обнаружены в метеоритах Оргей (C11), Мурчисон (CM2), Агуас Заркас (CM2), Тагиш Лэйк (C, без группы) и многих других (Kvenvolden et al., 1970; Kvenvolden, 1975; Engel and Nagy, 1982; Engel et al., 1990, 2005; Engel and Macko, 1997, 2001; Cronin and Pizzarello, 1997; Ehrenfreund, 2001; Glavin et al., 2018, Sephton, 2002). Лишь 7 (глицин **Gly**, аланин **Ala**, аспарагиновая кислота **Asp**, глутаминовая кислота **Glu**, лейцин **Leu**, пролин **Pro**, валин **Val**) из 20 стандартных протеиногенных аминокислот были обнаружены в результате кислотного гидролиза фрагментов Оргея (Lawless et al., 1972; Engel et al., 2005).

Аланин в Оргее представлен рацематом ( $D/L=1$ ), но соотношения  $D/L$  аспарагиновой кислоты ( $\sim 0,52$ ) и глутаминовой кислоты ( $\sim 0,25$ ) обнаруживают значительно большее содержание  $L$ -энантиомера, чем могло бы образоваться в результате любого известного абиотического процесса (Ehrenfreund et al., 2001). Многие протеиногенные аминокислоты, характерные для архей, бактерий и эукариот, не были обнаружены ни в Оргее, ни в других углистых хондритах. Сам факт отсутствия этих протеиногенных аминокислот может быть доводом в пользу того, что метеориты не подверглись контаминации земными организмами, так как все живые организмы на Земле содержат в себе полный набор таких аминокислот. Более того, соотношения  $D/L$  указывают на то, что некоторые из протеи-

mixture (Mitterer, 1993). This slow increase in  $D/L$  ratio can be used to measure the time elapsed since the organism died (Bada, 1971; Kvenvolden, Blunt and Clifton, 1979; Kaufman and Miller, 1992; Cann and Murray-Wallace, 1986; Wehmellir, 1993).

Many of the protein amino acids, as well as a host of amino acids with no known function in terrestrial biology have been found in the Orgueil C11, Murchison CM2, Aguas Zarcas CM2, Tagish Lake C-ungrouped and many other carbonaceous meteorites (Kvenvolden et al., 1970; Kvenvolden, 1975; Engel and Nagy, 1982; Engel et al., 1990, 2005; Engel and Macko, 1997, 2001; Cronin and Pizzarello, 1997; Ehrenfreund, 2001; Glavin et al., 2018; Sephton, 2002). At this moment only 7 (Glycine **Gly**, Alanine **Ala**, Aspartic Acid **Asp**, Glutamic Acid **Glu**, Leucine **Leu**, Proline **Pro**, Valine **Val**) of the 20 standard proteinogenic amino acids have been detected in acid hydrolyzed hot water extracts of the Orgueil meteorite (Lawless et al., 1972; Engel et al., 2005).

The Orgueil alanine is racemic ( $D/L=1.0$ ) but the  $D/L$  ratios of aspartic acid ( $\sim 0.52$ ) and glutamic acid ( $\sim 0.25$ ) reveal an  $L$ -excess far greater than obtainable by any known abiotic production mechanism (Ehrenfreund et al., 2001). Many of the protein amino acids, which are common in Archaea, Bacteria and Eukarya are missing in Orgueil and other carbonaceous meteorites. The missing protein amino acids may be an argument in favor of the statement that the stones are not contaminated by terrestrial biological remains since all life on Earth contains the complete set. Furthermore, the  $D/L$  ratios show that some meteorite protein amino acids are nearly racemic, while others exhibit a very significant excess of the  $L$  enantiomer.

The C:S ratio of the Orgueil fossils often is very different from the ratio  $C:S \sim 32.25$  of living aquatic bacterial cells (Fagerbakke et al., 1996). These EDS spectral data suggest that the Orgueil biological remains are indigenous and ancient.

Advanced instruments developed for analysis of the lunar rocks applied to the study of carbonaceous meteorites resulted in the detection of sugar-related compounds (polyols), amines, carboxylic

ногенных аминокислот в метеоритах почти рацематны, в то время как другие обнаруживают значительный избыток L-энантиомера.

Соотношение C:S для фоссилий Оргея зачастую также значительно отличается от C:S~32,25, характерного для живых водных бактериальных клеток (Fagerbakke et al., 1996). Таким образом, предоставленные данные ЭДС могут указывать на индигенность и древность биологических остатков Оргея.

Применение передовых инструментов, разработанных для анализа лунных пород, позволило обнаружить в углистых метеоритах соединения сахаров (полиолы), амины, азотистые основания сульфокислоты и фосфоновые кислоты, алифатические и ароматические углеводороды, сотни идентифицированных аминокислот, азотные гетероциклические соединения, включая необходимые для жизни нуклеиновые основания и более 14,000 отдельных молекулярных соединений. Многие органические вещества, ранее обнаруженные в Оргее и принятые за контаминанты, были также обнаружены и в других углистых хондритах, при этом эти вещества были определены как индигенные и внеземные (Pizzarello, Cooper and Flynn, Cooper et al., 2001; Schmitt-Kopplin et al., 2010; Aponte, 2015; Glavin et al., 2018; Glavin et al., 2020a,b). Помимо протеиногенных аминокислот, в этих метеоритах было обнаружено значительное количество других аминокислот, многие из которых не имеют известной биологической функции и редко встречаются, или полностью отсутствуют, в земной биосфере. Некоторые – со значительным избытком L-энантиомера.

Нестабильные основания цитозин и тимин ни в Оргее, ни в других углистых метеоритах обнаружены не были. При 0 °C период полураспада более стабильных оснований (аденина, гуанина и урацила) превышает 1 млн. лет, в то время как для цитозина это время составляет примерно 17,000 лет. Как следствие, отсутствие тимина и цитозина в Оргее указывает на то, что материал метеорита не подвергался контаминации современными живыми, или недавно умершими, земными микроорганизмами.

acids, sulfonic and phosphonic acids, aliphatic and aromatic hydrocarbons, and hundreds of identified amino acids, nitrogen heterocyclic compounds including the life-critical nucleobases, and over 14,000 distinct molecular compounds. Many organics that had previously been found in Orgueil and dismissed as contaminants were also found in other carbonaceous meteorites and recognized as indigenous and extraterrestrial. (Pizzarello, Cooper and Flynn, 2006; Cooper et al., 2001; Schmitt-Kopplin et al., 2010; Aponte, 2015; Glavin et al., 2018; Glavin et al., 2020a,b). In addition to the proteinogenic amino acids, there is a great array of other amino acids in these meteorites with no known function in biology and which are rare or entirely absent in the terrestrial biosphere. Some of them have a significant L-excess.

The unstable nucleobases Cytosine and Thymine have never been detected in Orgueil or any other carbonaceous meteorites. At 0 °C, the half-life of the more stable nucleobases (Adenine, Guanine, and Uracil) exceeds 1 million years, but the half-life of Cytosine is only 17,000 years. The absence of Cytosine and Thymine in Orgueil reveals the stones are not contaminated with modern living or recently dead terrestrial microorganisms.

## VI. История предыдущих исследований микрофоссилий в метеорите Оргей

В марте 1961 года Бартоломью Надь и Дуглас Хеннеси из Университета Фордхэма вместе с Уорреном Майншайном из Esso Research опубликовали (Nagy et al., 1961) результаты масс-спектрометрического анализа метеорита Оргей, в которых было показано, что многие углеводороды метеорита являются «сильными» биомаркерами и во многом напоминают углеводороды, образующиеся в результате биогеохимической деградации древних форм жизни, встречающихся в угольных и нефтяных месторождениях на Земле.

В ноябре 1961 г. Надь вместе с Джорджем Клаусом, микробиологом из Нью-Йоркского университета, сообщили об обнаружении «частиц микроскопического размера, характерных для метеоритов, подобных ископаемым водорослям», которые они интерпретировали как возможные микрофоссилии (Claus, Nagy, 1961) в углистых хондритах Оргей и Ивуна (CII). Эта статья вызвала интенсивные дебаты относительно возможной биогенности этих частиц, которые они назвали «организованными элементами» (рис. 2а-d). Исследователи сообщили о пяти типах организованных элементов:

1. *«Маленькие, округлые формы, окруженные двойной стенкой с утолщениями, иногда скульптурированные бугорками. Диаметр от 4 до 10 мкм. Желтовато-зеленые в проходящем свете. Внутренняя структура гомогенная или зернистая.»*
2. *Напоминают первый тип, но поверхность покрыта шипами и иными придатками или несет на себе бороздку. При-*

## VI. History of the previous studies of microfossils in the Orgueil meteorite

In March, 1961, Bartholomew Nagy and Douglas Hennessey from Esso Research published (Nagy et al., 1961) the results of mass spectrometric analysis of the Orgueil meteorite. Their study revealed that many of the meteorite hydrocarbons are “strong” biomarkers and in many ways resemble hydrocarbons produced by the biogeochemical degradation of ancient life forms as encountered in coal and petroleum deposits on Earth.

In November, 1961 Nagy, together with George Claus, a microbiologist from New York University, reported the detection of a variety of “microscopic-sized particles indigenous to meteorites similar to fossil algae” that they interpreted as possible microfossils (Claus and Nagy, 1961) in the Orgueil and Ivuna CII carbonaceous meteorites. This paper triggered an intense debate concerning the possible biogenicity of these particles, which they designated “organized elements” (pic. 2a-d). These researchers reported five types of organized elements:

1. *“Small, circular forms, surrounded by double walls which showed thickening and occasional sculpturing with protuberances. Their diameter varied between 4 and 10  $\mu$  and they appeared yellowish-green in transmitted light. The interior of the organized elements appeared to be either homogeneous or granulated.”*
2. *The second type resembled the first; however, the surfaces of these organized elements were covered with spines and other appendages or with a furrow. The appendages usually appeared to be tubular in shape, and occasionally they penetrated through the walls. The*



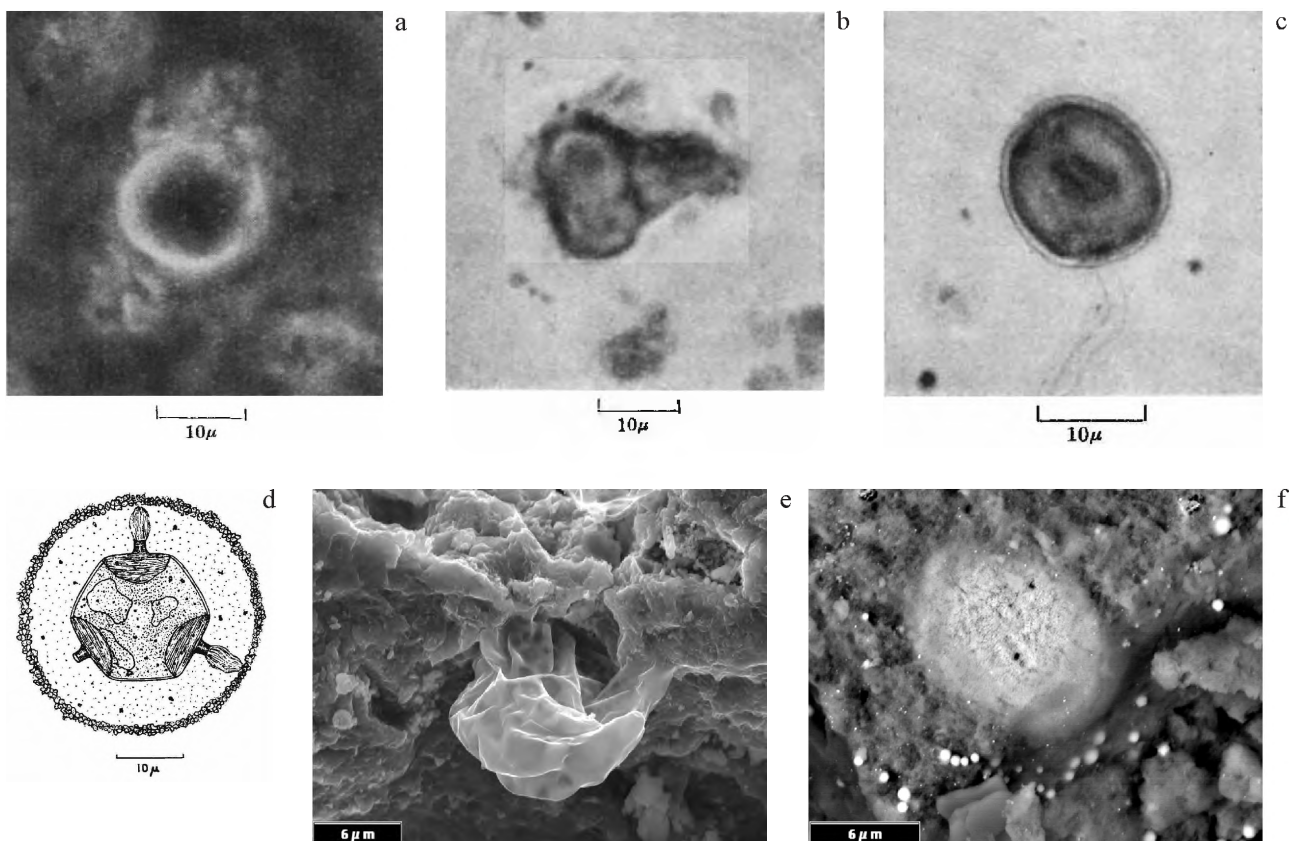


Рис. 2. «Организованные элементы» в метеорите Оргей: а – тип 1, b, c – тип 2, d – эскиз типа 5 (Claus, Nagy, 1961), СЭМ-изображение богатой серой формы (C/S-0.31) в Оррее ~ тип 2, f – СЭМ-изображение богатой железом яйцевидной формы в углистом чехле в Оррее ~ тип 2 (Rossignol-Strick et al., 2005)

Pic. 2. “Organized elements” in the Orgueil meteorite: a – type 1, b, c – type 2, d – sketch of type 5 (Claus, Nagy, 1961); e – SEM image of Sulfur-rich (C/S-0.31) form in Orgueil ~ type 2, f – SEM image of Fe-rich ovoid form in carbonaceous sheath in Orgueil ~ type 2 (Rossignol-Strick et al., 2005)

датки, обычно цилиндрической формы, иногда пронизывают стенки. Диаметр 8–30 мкм. Диаметр выростов 0.5–2 мкм. Массивные придатки имеют булабовидные образования на дистальных концах. Шипы сгруппированы парами вокруг придатков. Бороздка начинается от одного придатка на вершине организованного элемента.

3. Третий тип имеет форму щита. Придатки отсутствуют. Стенки с заметным утолщением и скульптурой. Средний диаметр составляет приблизительно 15 мкм.

diameter of the appendages varied between 0.5 and 2  $\mu$ , and that of the organized elements was between 8 and 30  $\mu$ . Solid appendages had club-like structures on their distal ends. Spines were arranged in pairs around the appendages. The furrow started at the single appendage on the apex of the organized elements.

3. The third type of the organized elements had shapes like shields. They had no appendages. Their walls showed marked thickening and sculpturing; their average diameter was approximately 15  $\mu$ .

4. *Цилиндрические формы, стенками толстые с мелкой скульптурой поверхности. Длин – около 20 мкм, высота – 10–12 мкм.*
5. *Гексагональная форма, хотя этот организованный элемент может содержать 10–12 поверхностей. Три поверхности значительно толще остальных и служат основами для трех толстых, трубчатых отростков. Этот организованный элемент как бы окружен бесструктурным гало, которое прерывалось только каким-то материалом, выступающим из двух придатков. В состав организованного элемента входят три вакуолеобразные тела неправильной формы».*

В метеорите Ивуна были представлены только 3 из 5 типов Оргея. Концентрация организованных элементов в Оргее составляла 1650–1700 на 1 мг. Авторы предположили, что организованными элементами являются древние микрофоссилии, потому что:

1. Высокая концентрация организованных элементов может иметь место в среде, где в течение длительного времени постоянно присутствует жидкая вода. Образцы метеоритов были собраны в течение нескольких часов после наблюдаемого падения и отправлены ведущим химикам и геологам Франции для научного анализа. Было быстро замечено, что фрагменты распадаются при помещении в воду.
2. Организованные элементы типов 1–4 схожи (но не идентичны) с земными видами динофлагеллят или хризомонад, которые живут в воде морей и озер, но не содержатся в почве. Тип 5 морфологически отличается от всех известных земных форм.
3. Земные организмы, схожие с организованными элементами типов 1–4, образуют цисты при неблагоприятных условиях. Только два или три организованных элемента в метеоритах Оргей и Ивуна напоминают цисты.

4. *Cylindrical forms were seen which had thick walls and finely sculptured wall surfaces. Their length was approximately 20  $\mu$ , their width was 10-12  $\mu$ .*
5. *An apparently hexagonal form was also observed. This organized element may contain, however, 10-12 surfaces. Three of the surfaces were considerably thicker than the others and they served as the bases of the three, thick, tubular protrusions. The organized element seemed to be surrounded by a structureless halo, which was interrupted only by some matter that was protruding from two of the appendages. There were three vacuole-like and irregularly shaped bodies in the interior of the organized element.”*

In the Ivuna meteorite, only 3 of the 5 Orgueil types were represented. The reported concentration of organized elements in Orgueil was 1650–1700 per mg. The authors suggested that organized elements are ancient microfossils, because:

1. A high concentration of organized elements could occur in an environment where there has been continuous liquid water for a long time. Samples of meteorites were collected within hours of the observed fall and sent to the premier chemists and geologists of France for scientific analysis. It was quickly recognized that the stones disintegrate when placed in water.
2. Organized elements of types 1 to 4 are similar (but not identical) to terrestrial dinoflagellates or chrysomonads, which live in the waters of seas and lakes, but are not found in the soil. Type 5 is morphologically different from all known terrestrial forms.
3. Terrestrial microorganisms similar to organized elements of types 1–4 form cysts under adverse conditions. Only two or three organized elements in the Orgueil and Ivuna meteorites resemble cysts.
4. Both meteorites, which fell at different times and in different climatic zones contain the same types of elements, which argues against terrestrial contamination.

4. Оба метеорита, упавшие в разное время и в разных климатических зонах, содержат элементы одного и того же типа, что свидетельствует против земной контаминации.

Их результаты были немедленно оспорены Фрэнком Фитчем и Эдвардом Андерсом (Fitch et al., 1962; Anders, Fitch, 1962), которые утверждали, что «организованными элементами» являются либо минералы, артефакты покрытия, пыльца амброзии, либо другие загрязнители, и назвали субъективными выводы, основанные на морфологии. Концепция, согласно которой невозможно идентифицировать биологические объекты с помощью «только морфологии», стала широко принятой многими учеными. Они не могут признать, что форма, размеры и детальные морфологические характеристики фоссилий имеют решающее значение для палеонтологической науки.

Фрэнк Стэплин (Staplin, 1962) обнаружил в Оргее органические остатки, которые он разделил на три группы: микрофоссилии неизвестного систематического положения или возраста, современные контаминанты и меловые микрофоссилии (очень мало). На основании морфологических характеристик Стэплин выделил ряд типов (первые три он посчитал совершенно новыми): 1) линзовидные тела с гексагональной структурой (наиболее распространенный тип); 2) темные янтарно-красные сферы с гранулированной стенкой; 3) фрагменты трубочек с полигональными каналами; 4) гибкая лентовидная ткань, покрытая углистым чехлом; 5) гибкие кусочки ткани без видимой структуры; 6) маленькие гибкие тонкостенные цисты сферической формы, условно отнесенные автором к роду *Protoleiosphaeridium* (Тимофеев, 1959); 7) темно-янтарно-красные кубические объекты с грубозернистой структурой; 8) гранулированные объекты с сетчатой структурой, частично минерализованной стенкой, напоминающие пыльцу голосеменных растений, но отличающиеся от последних структурой.

Ботаник Пирошка Палик (Palik, 1962) из Будапештского университета им. Лорандо Этвё-

Their results were immediately challenged by Fitch and Anders (Fitch et al., 1962, Anders, Fitch, 1962), who argued the «organized elements» were either minerals, coating artifacts, Ragweed pollen grains or other contaminants and called conclusions based on morphology as subjective. The concept that it is not possible to identify biological entities by «morphology alone» has come to be widely accepted by many scientists. They fail to recognize that the shape, size range and detailed morphological characteristics of fossils are crucial to the Science of Paleontology.

Frank Staplin (1962) found organic residues in Orgueil, which he divided into: microfossils of unknown systematic position or age, modern contaminants, or Cretaceous microfossils (very few). On the basis of morphological characteristics, Staplin grouped a number of types (the first three he considered completely new): 1) lenticular bodies with a hexagonal structure (the most common type); 2) dark amber-red spheres with a granular wall; 3) fragments of tubes with polygonal channels; 4) flexible ribbon-like fabric coated with a carbon cover; 5) flexible pieces of fabric with no visible structure; 6) small flexible thin-walled cysts of a spherical shape, conditionally assigned by the author to the genus *Protoleiosphaeridium* (Тимофеев, 1959); 7) dark amber-red cubic objects with a coarse-grained structure; 8) granular objects with a mesh structure; partially mineralized wall, resembling pollen of gymnosperms, but differing from the latter in structure.

Botanist Piroška Palik (Palik, 1962) from Eötvös Loránd University in Budapest examined a sample of the Orgueil meteorite and found six filamentous structures morphologically similar to “blue green algae” (cyanobacteria) (pic. 3a). The width of the fragments of threads varies from 3 to 23 microns, the length is 40–170 microns. They were interpreted by the author as possibly indigenous to the meteorite. Palik’s illustrations showed detailed morphological features known in differentiated cyanobacterial filaments with apical cells. In 2001, Hoover and Rozanov published Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) images of microfossils found in the Murchison CM2 car-



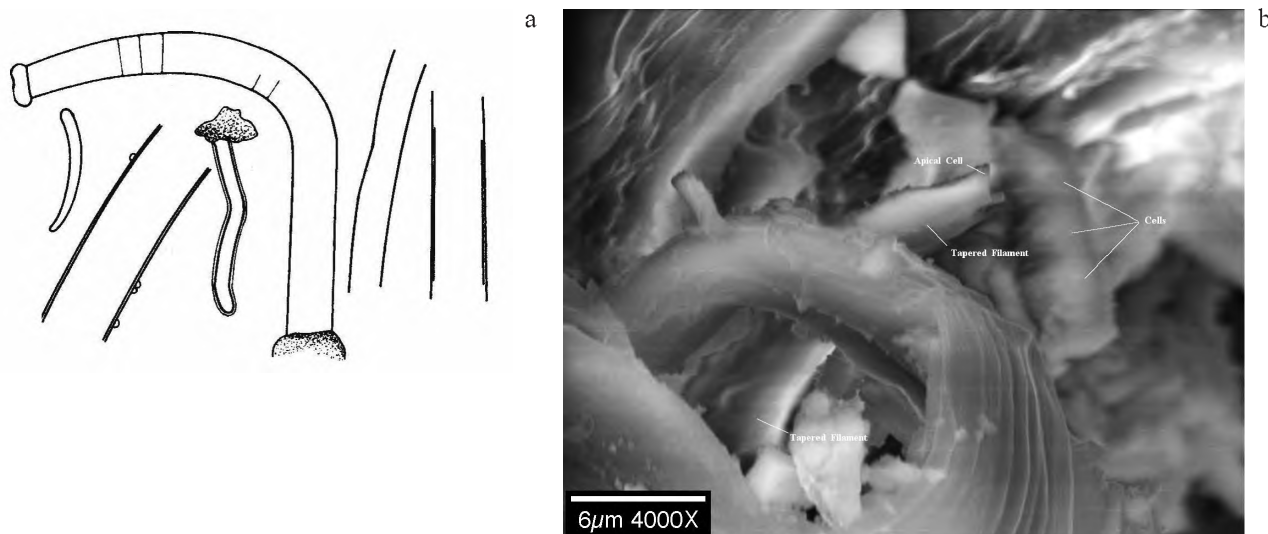


Рис. 3. а – нитчатые формы в метеорите Оргей (Palik, 1962); б – сужающаяся нить с апикальной клеткой в Мурчисоне, сходная по размеру и морфологии с сужающейся нитью Палик, найденной в Оргей (Hoover, Rozanov, 2001)

Pic. 3. a – filamentous forms in the Orgueil meteorite (Palik, 1962); b – tapered filament with apical cell in Murchison similar in size and morphology to tapered filament Palik found in Orgueil (Hoover, Rozanov, 2001)

ша исследовала образец метеорита Оргей и обнаружила шесть нитчатых образований, морфологически сходных с синие-зелеными водорослями (цианобактериями) (рис. 3а). Ширина нитей 3–23 мкм, длина – 40–170 мкм. Они были интерпретированы как возможно индигенные для метеорита. Иллюстрации Палик показали детальные морфологические особенности, известные в дифференцированных цианобактериальных нитях с апикальными клетками. В 2001 г. Хувер и Розанов опубликовали изображение микрофоссилий, обнаруженных в углистом хондрите Мурчисон (СМ2), которые сходны по размеру (5×18 мкм) и деталям морфологических особенностей с оргейскими формами в статье Палик. Изображение было получено с помощью сканирующего электронного микроскопа в режиме естественной среды (ESEM). В формах Мурчисона видны внутренние клетки и однорядная нить с небольшим сужением к закругленной вершине и апикальной клеткой, покрытой фол-

bonaceous chondrite of similar size (5×18 μm) and detailed morphological features of Orgueil forms in Palik’s article. The Murchison forms exhibited internal cells and a uniseriate filament with slight tapering toward the rounded off apex and follicle covered apical cell (calyptra) (Hoover, Rozanov, 2001). This form (pic. 3b) has similar morphological features with the large central filament 2 as illustrated by Palik.

Sam VanLandingham et al. (VanLandingham, 1965; VanLandingham et al., 1967) concluded that rounded objects in the Orgueil meteorite: 1) have a certain degree of structural organization; 2) are most likely indigenous. They were located inside the mineral matrix of the meteorite, which makes it unlikely they were modern biological contaminants.

Tan and VanLandingham, (1967) using Transmission Electron Microscopy discovered a number of short filaments (pic. 4) (rounded at one end and conical at the other) in the Orgueil meteorite with linear chains of “electron dense solid bodies” that

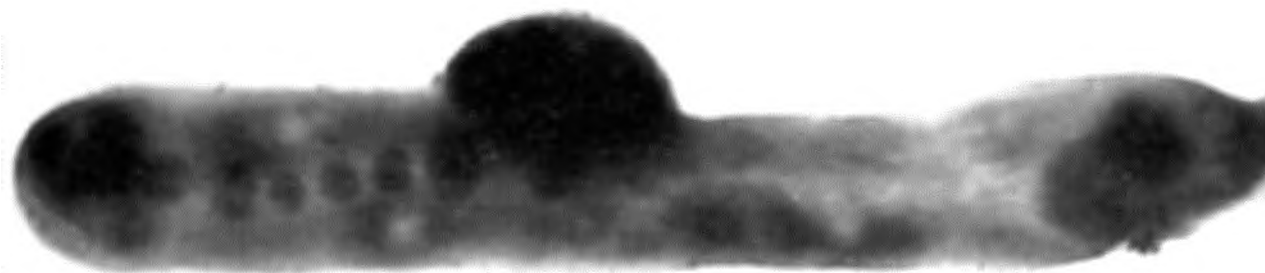


Рис. 4. Нить магнитотактической бактерии из метеорита Оргей, видны домены магнетита (магнитосомы) (Tan, VanLandingham, 1967)

Pic. 4. The filament of a magnetotactic bacterium from the Orgueil meteorite, the domains of magnetite (magnetosomes) are visible (Tan, VanLandingham, 1967)

ликулом (калиптра) (Hoover, Rozanov, 2001). Эта форма (рис. 3b) имеет схожие морфологические особенности с большой центральной нитью из иллюстрации Палик.

Сэм ВанЛэндингем и др. (VanLandingham, 1965; VanLandingham et al., 1967) сделали вывод о том, что округлые объекты в метеорите Оргей: 1) обладают некоторой степенью структурной организации; 2) скорее всего, являются индигенными. Расположение этих объектов внутри минерального матрикса метеорита делает маловероятным, чтобы они были современными биологическими контаминантами.

Тан и ВанЛэндингем (Tan, VanLandingham, 1967), используя просвечивающую электронную микроскопию, обнаружили в метеорите Оргей несколько коротких нитей (закругленных на одном конце и конических на другом) (рис. 4) с линейными цепочками «электронно-плотных твердых тел», простиравшихся вдоль их осей. Несколько десятилетий спустя Михаил Вайнштейн из ИБФМ РАН указал Хуверу на сходство этих признаков с выравнением магнитосом в продольную цепочку у магнитотактических

extended along the longitudinal axis of these forms. Several decades later, Mikhail Vainshtein of IBPM RAS pointed out to Hoover the similarity of these features to the alignment of magnetosomes into longitudinal chains within the cells of magnetotactic bacteria. In 1967, the very existence of these microorganisms was unknown to the field of science.

Harold C. Urey, recipient of the 1934 Nobel Prize in Chemistry, provided a review of organic compounds and biological material in meteorites (Urey, 1966). He noted that Oro had found his Orgueil sample to be sterile, just as had been found by Pasteur who examined the Orgueil meteorite stones collected immediately after the fall. According to Urey “a museum shelf does not appear to be a particularly likely place for the growth of biological organisms, particularly when the material contains solid magnesium sulfate, which in the presence of a slight amount of absorbed moisture would give a concentrated solution of magnesium sulfate”. Considering data on studies of organic material in meteorites, he came to the conclusion that organized elements are indigenous to meteorites, and they also have a biogenic nature. Urey

бактерий. В 1967 г. существование этих микроорганизмов было еще неизвестно науке.

Гарольд К. Юри, лауреат Нобелевской премии по химии 1934 г., представил обзор органических соединений и биологического материала в метеоритах (Urey, 1966). Он отметил, что по данным Оро, его образец Оргея был стерильным, подобно тому, как это в свое время установил Пастер, изучавший фрагменты метеорита Оргей, собранные сразу после падения. По словам Юри, *«музейная полка, по-видимому, не является особенно вероятным местом для роста биологических организмов, особенно когда материал содержит твердый сульфат магния, который в присутствии небольшого количества поглощенной влаги дает концентрированный раствор сульфата магния»*. Юри обсудил тот факт, что особенности спектрального поглощения ванадилпорופиринов (Hodgson, Baker, 1964) в Оргее сходны с таковыми у древних биомолекул в земных отложениях, но не обнаруженных в живых или недавно умерших земных организмах. Юри заметил: *«Если бы некоторые вещества в метеоритах были обнаружены в земных объектах, их можно было бы считать бесспорно биологическими»*.

Мартин Россиньол-Стрик и Элсо Баргхурн (Rossignol-Strick, Barghoorn, 1971) произвели обработку образцов метеорита Оргей при помощи стандартных методов, применяемых в палинологических исследованиях. Найдены полые сферы, мембраны, воронковидные, спиральные структуры и т. д. (Согласно данным ЭДС, полученным в Космическом центре Маршалла, многие нити Оргея представляют собой углистые чехлы, заполненные водорастворимым сульфатом магния, а яйцевидные формы представлены нанопибриллами железа, покрытыми углистой оболочкой (рис. 2f). Воздействие воды и сильных кислот приводит к растворению сульфата магния и железа, оставляя полые сферы, овоиды и мембраны). Было отмечено, что эти структуры, как и сам матрикс, не окрашиваются сафраниновыми красителями, в то время как пыльцевые зерна быстро адсорбируют сафранин. Отмечено морфологическое

discussed that the spectral absorption features of vanadyl porophyrins (Hodgson and Baker, 1964) in Orgueil are similar to those of ancient biomolecules in terrestrial sediments. Vanadyl porophyrins are not found in living or recently dead terrestrial organisms. Urey remarked: *“If found in terrestrial objects, some substances in meteorites would be regarded as indisputably biological”*.

Martine Rossignol-Strick and Elso Barghoorn (Rossignol-Strick, Barghoorn, 1971) processed the samples of the Orgueil meteorite using standard palynological methods. Hollow spheres, membranes, funnel-shaped, spiral structures, etc. were found. (NASA/MSFC EDS data revealed that many of the Orgueil filaments are carbonaceous sheaths infilled with water soluble Magnesium Sulfate, and ovoids are composed of nanofibrils of iron covered with a carbonaceous sheath (pic. 2f). Treatment with water and strong acids would have dissolved magnesium sulfate and iron leaving hollow spheres, ovoids and membranes). It was noted that these structures, like the matrix itself, are not stained with safranin dyes, while pollen grains quickly adsorb safranin. The morphological difference of these structures from pollen grains, spores of fungi and textile fibers is noted. It has been suggested that the abundance of these structures in the Orgueil meteorite, as well as their homogeneous structure, may indicate that they are not contaminants.

B. Nagy (1975) in his detailed summary of carbonaceous chondrites, publishes a review of all the studies conducted at that time on this topic. In addition, in this work there are previously unpublished images of microscopic structures in Orgueil (pic. 5).

In the process of a great debate over the nature of the organized elements and hollow spheres of the Orgueil meteorite, the critics interpreted them as organic coatings of an abiotic nature on olivine microchondrules, magnetite and glass globules or as pollen grains and other recent terrestrial biological contaminants (Anders et al., 1962; Fitch, Schwarz & Anders, 1962; Fitch and Anders, 1963a,b). The debate was won in 1964 by Anders and coworkers when their paper entitled «Contaminated Meteorite» was published in Science. They reported they

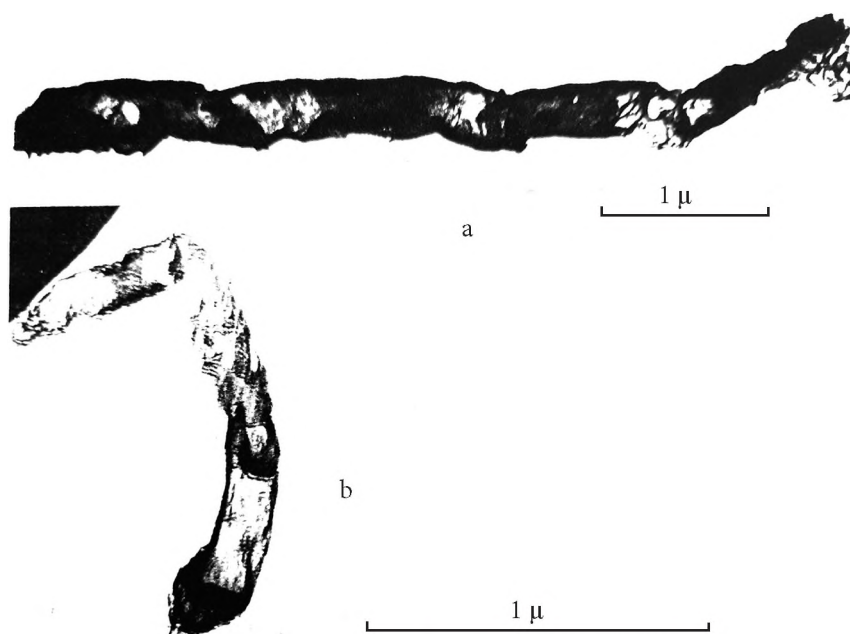


Рис. 5. Тонкие рейкообразные структуры в метеорите Оргей (Nagy, 1975)

Pic. 5. Thin lath-like structures in the Orgueil meteorite (Nagy, 1975)

отличие данных структур от пыльцевых зерен, спор грибов и текстильных волокон. Высказано предположение, что обилие этих структур в метеорите Оргей, а также их однородная структура могут указывать на то, что они не являются контаминантами.

Б. Надь в 1975 г. в своей подробнейшей сводке по углистым хондритам опубликовал обзор всех исследований, проведенных на тот момент по данной теме (Nagy, 1975). Кроме того, в данной работе присутствуют неопубликованные ранее изображения микроскопических структур в Оргее (рис. 5).

В ходе больших дебатов о природе организованных элементов и полых сфер метеорита Оргей критики интерпретировали их как органические покрытия абиотической природы на оливиновых микрохондрах, магнетитовых и стеклянных глобулах или как пыльцевые зерна и другие современные наземные биологические контаминанты (Anders et al., 1962; Fitch, Schwarz

had examined Orgueil sample No. 9419, that they had obtained from the Montauban Museum. The authors of the article claimed they had discovered that this Orgueil fragment had been contaminated with “*biogenic materials: coal fragments, seed capsules of the reed *Juncus conglomeratus*, other plant fragments, and an optically active, water-soluble protein material resembling collagen-derived glues*” (Anders et al., 1964). They concluded that this contamination was the result of intentional «human intervention» and therefore – a hoax. This one paper explained the presence of all Orgueil biomarkers (kerogen, humic acids, porphyrins, pristane, phytane, amino acids, and organized elements) found by Nagy and other scientists who investigated these stones. Anders and coauthors argued that this intentional human introduction of biogenic materials may have been done as a «practical joke» or to influence the 19th century debate about “spontaneous generation” of life by showing its transformation from inorganic matter». How-



& Anders, 1962; Fitch and Anders, 1963a,b). Дебаты были выиграны в 1964 г. Андерсом и его коллегами, когда их статья под названием «Загрязненный метеорит» была опубликована в журнале *Science*. Они сообщили, что исследовали образец Оргея № 9419, полученный из музея Монтобана. Авторы статьи утверждали, что этот фрагмент Оргея был загрязнен «биогенными материалами: фрагментами угля, семенными коробочками тростника *Juncus conglomeratus*, другими фрагментами растений и оптически активным водорастворимым белковым веществом, напоминающим клей, полученные из коллагена» (Anders et al., 1964) и пришли к выводу, что это загрязнение было результатом преднамеренного «вмешательства человека» и, следовательно, – обмана. В этой статье обосновывается присутствие всех биомаркеров в Оргее (керогена, гуминовых кислот, порфиринов, пристана, фитана, аминокислот и организованных элементов), обнаруженных Надем и другими учеными, исследовавшими эти фрагменты метеорита. Андерс с соавторами утверждали, что это преднамеренное введение человеком биогенных материалов, возможно, было сделано в качестве «розыгрыша» или чтобы повлиять на результаты дебатов XIX века о «самопроизвольном зарождении» жизни, показывая ее трансформацию из неорганической материи. Однако очевидно, что связывание метеорита Оргей с мистификацией или научным мошенничеством на протяжении десятилетий подавляло исследования органических соединений и микрофоссилий в Оргее. И это все еще оказывает значительное влияние на многих членов метеоритного сообщества, которые неизменно игнорируют возможность того, что биологические, метаболические и ферментативные процессы могли сыграть свою роль в производстве любого из метеоритных органических соединений. Они приложили огромные усилия в неудачных попытках объяснить присутствие сложного комплекса биомолекул и продуктов их диагенетического распада механизмами абиотической продукции, а также обнаружить небιологические пути амплификации для значительного *L*-энантиомерного избытка

ever, it is clear that linking the Orgueil meteorite to a hoax or scientific fraud stifled the research for organics and microfossils in Orgueil for decades. And it still exerts significant influence over many members of the meteoritical community, who have consistently failed to consider the possibility that biological, metabolic and enzymatic processes may have played a role in the production of any of the meteoritic organic compounds. They have devoted enormous effort in unsuccessful attempts to explain by abiotic production mechanisms the complex suite of biomolecules and their diagenetic breakdown products and to discover non-biological amplification pathways for the significant *L*-enantiomeric excess of extraterrestrial proteinogenic amino acids that have been found in Orgueil, Murchison, GRA95229, Aguas Zarcas and many other carbonaceous meteorites.

Rossignol-Strick, Hoover et al. (2005) conducted a re-examination of organized elements in the Orgueil meteorite based on FESEM images and EDS data analysis. Forms with size and morphological features of several of the organized elements have been detected in freshly fractured interior surfaces of Orgueil (**pic. 2e,f**), and based on elemental analysis it was concluded that they are not modern biocontaminants.

J. Aerts et al. (2016) conducted a quantitative search for biological contaminants in Orgueil meteorite. The technique used was so sensitive that a single DNA molecule from only one living or dead bacterial cell or grain of pollen could be detected. The results were negative and this fact, according to the researchers, means that biological contaminants were not present in the fraction of the Orgueil meteorite examined. Aerts et al. (2016) concluded: “*Our results show no evidence for significant contamination of the investigated fraction of the Orgueil meteorite with microorganisms, seeds, pollen, or plants*”.

Since the mid-1990s, in the course of micropaleontological studies in the carbonaceous meteorites, various fossilized bacteria and protists have been found (Позанов, 1996; Жмур и др., 1997; Hoover, 1997; Hoover et al., 1998; Hoover and Ro-

внеземных протеиногенных аминокислот, которые были обнаружены в Орее, Мурчисоне, GRA95229, Агуас Заркас и многих других углистых хондритах.

Россиньол-Стрик, Хувер и др. (Rossignol-Strick et al., 2005) провели повторную проверку организованных элементов в метеорите Оргей на основе FESEM-изображений и анализа данных ЭДС. На свежесколотых внутренних поверхностях Оргея были обнаружены формы с размером и морфологическими особенностями некоторых организованных элементов (рис. 2e,f), а на основании элементного анализа сделан вывод о том, что они не являются современными биоконтаминантами.

Й. Аэртс и др. (Aerts et al., 2016) произвели количественный поиск биологических контаминантов в метеорите Оргей. В ходе исследования применялись чрезвычайно чувствительные методы амплификации ДНК. Используемая техника была настолько чувствительной, что можно было обнаружить единственную копию ДНК из одной живой или мертвой бактериальной клетки или пыльцевого зерна. Результаты оказались отрицательными. Этот факт, по мнению исследователей, мог означать, что биологические контаминанты не присутствовали в той части метеорита Оргей, которая была изучена. Аэртс с коллегами также пришли к выводу: *«Наши результаты не свидетельствуют о существенном загрязнении исследуемой фракции метеорита Оргей микроорганизмами, семенами, пылью или растениями»* (Aerts et al., 2016).

Начиная с середины 1990-х гг. в ходе микропалеонтологических исследований в углистых хондритах были найдены разнообразные фоссилизованные бактерии и протисты (Розанов, 1996; Жмур и др., 1997; Hoover, 1997; Hoover et al., 1998; Hoover and Rozanov, 1999; Gerasimenko et al., 1999; Hoover, Rozanov, 2001; Hoover et al., 2004a,b; Hoover, Rozanov, 2005; Hoover, 2006a,b; Hoover, 2007a,b; Hoover, 2008a,b; Розанов, 2009; Hoover, 2009; Hoover, 2010; Астафьева и др., 2011; Hoover, 2011; Hoover, 2014; Hoover et al., 2018).

zanov, 1999; Gerasimenko et al., 1999; Hoover, Rozanov, 2001; Hoover et al., 2004a,b; Hoover, Rozanov, 2005; Hoover, 2006a,b; Hoover, 2007a,b; Hoover, 2008a,b; Розанов, 2009; Hoover, 2009; Hoover, 2010; Астафьева и др., 2011; Hoover, 2011; Hoover, 2014; Hoover et al., 2018).

## VII. Материал и методы

Материалы, использованные в этой работе, представлены фрагментами углистого хондрита Оргей (С11), полученными из образцов, предоставленных для научных исследований из следующих коллекций:

**1) Метеоритная коллекция Джеймса М. Дюпона**

**Фонд Планетарных Исследований, Чикаго, Иллинойс, США**

2 фрагмента: (0,4 г и 0,1 г).

Предоставлено: д-р Пол Сипиера.

**2) Метеоритная коллекция**

**Национальный музей естественной истории, Париж, Франция**

1 фрагмент S219: (0,5 г).

Предоставлено: д-р Клод Перрон.

2 фрагмента: (0,6 г и 0,3 г).

Предоставлено: д-р Мартин Россиньол-Стрик.

**3) Метеоритная коллекция**

**Музей естественной истории Виктора Бруна, Монтобан, Франция**

1 фрагмент: (0,8 г).

1 фрагмент с частичной корой плавления: (0,6 г).

1 флакон порошка Оргея: (0,9 г).

Предоставлено: д-р Эдми Ладье

После того как были получены образцы метеорита Оргей, они были помещены в стерильные герметичные стеклянные флаконы и хранились в сушильных шкафах. Для длительного хранения контейнеры для образцов продували отфильтрованным сухим азотом и хранили в морозильной камере при  $-80^{\circ}\text{C}$ . Все инстру-

## VII. Materials and Methods

The materials used in this work were fragments of the Orgueil C11 carbonaceous meteorite extracted from samples provided for scientific research from the following collections:

**1) James M. DuPont Meteorite Collection  
Planetary Studies Foundation, Chicago,  
Illinois USA**

2 stones: (0.4 gm & 0.1 gm).

*Courtesy: Dr. Paul Sipiера.*

**2) Meteorite Collection  
Musée Nationale d'Histoire Naturelle,  
Paris, France**

1 stone S219: (0.5 gm).

*Courtesy: Dr. Claude Perron.*

2 stones: (0.6 gm & 0.3 gm).

*Courtesy: Dr. Martine Rossignol-Strick.*

**3) Meteorite Collection  
Le Musée d'Histoire Naturelle Victor Brun,  
Montauban, France**

1 stone: (0.8 gm)

1 stone with partial fusion crust: (0.6 gm)

1 vial Orgueil powder: (0.9 gm)

*Courtesy: Dr. Edmée Ladier*

After the Orgueil meteorite samples were received, they were transferred into sterile sealed glass bottles and routinely stored in desiccator cabinets. For long term storage, the sample containers were purged with filtered dry nitrogen, and stored in the freezer at  $-80^{\circ}\text{C}$ . All tools and electron microscopy stubs were flame sterilized and the Orgueil sample broken and mounted with the freshly fractured interior surface exposed for examination (Hoover, 2006b).



менты и столики для электронной микроскопии стерилизовали пламенем, а образец Оргея раскалывали и устанавливали таким образом, что его внутренняя свежесколотая поверхность была открыта для исследования (Hoover, 2006b).

Отобранные образцы были исследованы посредством СЭМ и ЭДС в NASA/MSFC, ПИН РАН и ОИЯИ. В NASA/MSFC исследовались внутренние ненапыленные поверхности свежесколотых образцов. В ПИНе и ОИЯИ образцы были покрыты Au или Au/Pd напылением и установлены на столики СЭМ для получения изображений с высоким разрешением и анализа методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Изучаемые микроструктуры также располагались по свежесколотым внутренним поверхностям образцов.

Большая часть изображений, представленных в этом Атласе, была изучена в секторе астробиологии ЛРБ ОИЯИ с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 с рентгеновским микроанализатором. Некоторые изображения и ЭДС-спектры были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 2 в Палеонтологическом институте им. А.А. Борисяка РАН в Москве. Образцы метеорита Оргей также были исследованы в NASA/Центре космических полетов им. Маршалла в Хантсвилле, Алабама, США, с помощью сканирующего электронного микроскопа ElectroScan Corp. в режиме естественной среды (ESEM); сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-4100 с полевой эмиссией (FESEM) и СЭМ FEI Quanta 600 FEG. Эти приборы были способны получать изображения ненапыленных, непроводящих образцов и анализировать элементный состав с помощью энергодисперсионных рентгеновских спектрометров, способных обнаруживать элементы с  $Z > \text{бор}$  (Hoover, 2006b).

Большая часть образцов, представленных в данном атласе, хранится в секторе астробиологии Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ, г. Дубна (образцы ОИЯИ №№ 1/1–1/14) в герметичных контейнерах.

В ходе проверки возможности лабораторной контаминации образцов метеорита Оргей земными актиномицетами, проведенной в ОИЯИ, проростов обнаружено не было.

Selected fragments were investigated by Scanning Electron Microscopy/EDS at NASA/MSFC, PIN/RAS and JINR. At NASA/MSFC interior surfaces of freshly fractured uncoated samples were studied. At PIN and JINR the samples were coated with Au or Au/Pd. and mounted on the SEM stubs for high resolution imaging and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) analysis. The studied microstructures were located within freshly fractured interior surfaces of the samples.

Most images presented in this Atlas were studied in the astrobiology sector of the LRB of JINR using TESCAN VEGA 3 scanning electron microscope with an X-ray microanalyzer. Some images and EDS-spectra were obtained with the TESCAN VEGA 2 Scanning Electron Microscope at the A.A. Borissiak Paleontological Institute, RAS in Moscow and other images and EDS data were obtained at the NASA/Marshall Space Flight Center in Huntsville, AL, USA using the ElectroScan Corp. Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM); the Hitachi S-4100 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) and the FEI Quanta 600 FEG SEM. These instruments were capable of obtaining images of uncoated, non-conductive samples and analyzing element content with Energy Dispersive X-Ray Spectrometers capable of detecting Elements with  $Z > \text{Boron}$  (Hoover, 2006b).

Most of the samples presented in this atlas are stored in the astrobiology sector of the Laboratory of Radiation Biology, JINR, Dubna (specimens JINR 1/1–1/14) in sealed containers.

Testing at JINR of the possibility of laboratory contamination of the Orgueil samples with terrestrial actinomycetes resulted that no growth was detected.

## VIII. Описание микрофоссилий

Проведенные исследования показали наличие значительного количества кристаллов магнетита различных форм (табл. I, фиг. 1–3; табл. II, фиг. 1, 2; табл. III, фиг. 1, 2) и других мелких зерен и минеральных частиц, в частности кристаллов гипса (табл. III, фиг. 3), оливина (табл. III, фиг. 4; табл. V, фиг. 1, 2) и фрамбондов пирита (табл. III, фиг. 1–3), составляющих минеральный матрикс углистого хондрита Оргей (CII).

Кроме того, на свежесколотых внутренних поверхностях метеорита *in situ* было обнаружено большое разнообразие микрофоссилий. На основании их размера, диапазона размеров и морфологических особенностей они были интерпретированы как индигенные остатки возможных прокариотических и эукариотических микроорганизмов.

Первая группа находок была интерпретирована как вероятные прокариоты и представлена кокковидными, палочковидными и нитевидными формами. Кокковидные формы (табл. VI, фиг. 1, 2) размером 0,5–2,5 мкм в диаметре, зачастую окружены углистым чехлом. Палочковидные формы (табл. VII, фиг. 1, 2) от ~5 до 7 мкм в длину, и от ~1,5 до 2,5 мкм диаметром. Нитевидные формы морфологически сходны с нитевидными цианобактериями, серобактериями или актиномицетами. Среди них можно выделить несколько подгрупп:

**Форма 1.** Изогнутые нитевидные формы от округлого до удлинено-овального поперечного сечения диаметром около 5–10 мкм. Некоторые из них однорядные с толстым или

## VIII. Description of microfossils

The study of the meteorite revealed a significant number of magnetite crystals of various types (pl. I, figs. 1–3; pl. II, figs. 1, 2; pl. III, figs. 1, 2) and other minute grains and particulates, including crystals of gypsum (pl. III, fig. 3), olivine (pl. III, fig. 4; pl. V, figs. 1, 2) and pyrite framboids (pl. III, figs. 1–3), in the rock matrix of the Orgueil CII carbonaceous meteorite.

Moreover, a wide variety of microfossils was found *in situ* in freshly fractured interior surfaces of the meteorite. Based on their size, size range, and morphological features, they have been interpreted as the indigenous remains of probable prokaryotic and eukaryotic microorganisms.

The first major group of finds was interpreted as probable prokaryotes and consists of coccoidal, bacillar and filamentous forms. The coccoidal forms (pl. VI, figs. 1, 2) have diameter of 0.5–2.5  $\mu\text{m}$  and are often surrounded by a carbonaceous sheath. The bacillar forms (pl. VII, figs. 1, 2) have length ~5 to 7  $\mu\text{m}$  and diameter ~1.5 to 2.5  $\mu\text{m}$ . The filamentous forms resemble filamentous cyanobacteria, sulfur bacteria or actinomycetes. They can be divided into several characteristic subgroups:

**Form 1.** Curved or straight filamentous forms varying from rounded to elongated oval cross-section with diameter of ~5–10  $\mu\text{m}$ . Some of them are uniseriate with a thick or thin sheath as is known in many species of cyanobacteria and sulfur bacteria (pl. VIII, figs. 1, 2; pl. IX, figs. 1–3). On rare occasions it has been possible to see a single linear chain of distinguishable cells encased within a thick sheath (pl. VIII, fig. 2). Other filaments appear to have multiple trichomes within a com-

тонким чехлом, как это известно у многих видов цианобактерий и серобактерий (табл. VIII, фиг. 1, 2; табл. IX, фиг. 1–3). В редких случаях можно было видеть одну линейную цепь различных клеток, заключенную в толстый чехол (табл. VIII, фиг. 2). Другие нити, по-видимому, представлены несколькими трихомами в общем чехле (многорядные нити – табл. X, фиг. 1, 2; табл. XI, фиг. 1–5; табл. XII, фиг. 1–3; табл. XIII, фиг. 1, 2; табл. XIV, фиг. 1, 2; табл. XV, фиг. 1, 2; табл. XVI, фиг. 1, 2; табл. XVII, фиг. 1, 2), что согласуется со многими родами и видами цианобактерий. Некоторые формы имеют толстые богатые углеродом чехлы (иногда расслоенные и как правило заполненные сульфатом магния (табл. XI, фиг. 1–5; табл. XII, фиг. 1–3; табл. XIII, фиг. 1, 2). Некоторые нити могут ветвиться (табл. XII, фиг. 1–3; табл. XIII, фиг. 1, 2; табл. XIV, фиг. 1, 2). Ветви представлены следующими формами:

**Форма 1a.** Изогнутые или спирально-свернутые (с несоприкасающимися оборотами) нити округлого поперечного сечения диаметром 0,5–2 мкм. Могут встречаться как обособленно (табл. VIII, фиг. 1; табл. IX, фиг. 1–3; табл. XVIII, фиг. 1), так и являться ветвями многорядных нитей (табл. XII, фиг. 1–3; табл. XIII, фиг. 1, 2; табл. XIV, фиг. 1, 2; табл. XV, фиг. 1, 2).

**Форма 1b.** Очень тонкие нити с мелкими, регулярно расположенными утолщениями эллипсоидальной формы (табл. XVII, фиг. 2), толщина нитей от 0,2–0,3 мкм до 0,6–0,7 мкм; эллипсоидальные утолщения шириной от 0,5–0,6 мкм до 1,0–1,2 мкм, длиной от 0,5–0,7 мкм; расстояние между наиболее широкими частями утолщений варьирует от 1,0 до 2,5 мкм;

**Форма 2.** В отличие от спирально-свернутых нитей с несоприкасающимися оборотами (форма 1a) (табл. XVIII, фиг. 1), в метеорите Оргей встречаются также спиральные нитевидные формы с соприкасающимися оборотами, ширина витка около 4–6 мкм (табл. XVIII, фиг. 2; табл. XIX, фиг. 1, 2).

**Форма 3.** Нитевидные формы (1,5–2 мкм толщиной) с округлыми концами (диаметром

mon sheath (i.e., multiseriate filaments – pl. X, figs. 1, 2; pl. XI, figs. 1–5; pl. XII, figs. 1–3; pl. XIII, figs. 1, 2; pl. XIV, figs. 1, 2; pl. XV, figs. 1, 2; pl. XVI, figs. 1, 2; pl. XVII, figs. 1, 2) consistent with many genera and species of cyanobacteria. Some of the forms exhibit very thick carbon-rich sheaths (which are sometimes delaminated and *often* infilled with magnesium sulfate (pl. XI, figs. 1–5; pl. XII, figs. 1–3; pl. XIII, figs. 1, 2). Some exhibit branching (pl. XII, figs. 1–3; pl. XIII, figs. 1, 2; pl. XIV, figs. 1, 2). These branches are presented by following forms:

**Form 1a.** Curved or spiral filaments (non-contiguous turns) of rounded cross-section with diameter of 0.5–2  $\mu\text{m}$ . They can occur either separately (pl. VIII, fig. 1; pl. IX, figs. 1–3; pl. XVIII, fig. 1), or branches of multiseriate filaments (pl. XII, figs. 1–3; pl. XIII, figs. 1, 2; pl. XIV, figs. 1, 2; pl. XV, figs. 1, 2).

**Form 1b.** Extremely fine filaments with regular nodes of tiny ellipsoidal shape (pl. XVII, fig. 2). Diameter of filaments varies from 0.2–0.3  $\mu\text{m}$  to 0.6–0.7  $\mu\text{m}$ ; of ellipsoidal nodes from 0.5–0.6  $\mu\text{m}$  to 1.0–1.2  $\mu\text{m}$  diameter and length ~0.5–0.7  $\mu\text{m}$ ; and the distance between the widest parts of nodes varies from 1.0 to 2.5  $\mu\text{m}$ ;

**Form 2.** Coiled filaments about 2  $\mu\text{m}$  thick, with non-contiguous turns (pl. XVIII, fig. 1), as well as spiral filamentous forms with contiguous turns with average diameter of a single coil ~4–6  $\mu\text{m}$  (pl. XVIII, fig. 2; pl. XIX, figs. 1, 2).

**Form 3.** Filaments (diameter of 1.5–2  $\mu\text{m}$ ) and rounded apices (diameter of 2.5–3  $\mu\text{m}$ ) consistent with the terminal heterocysts or akinetes that are common in the cyanobacteria or sporangia of actinomycetes (pl. XIX, fig. 2).

Microfossils in the Orgueil meteorite that are interpreted as probable eukaryotic forms can also be divided into several subgroups.

*The prasinophytes.* Spherical (pl. XX, figs. 1–3; pl. XXI, figs. 1, 2; pl. XXII, fig. 1; pl. XXIII, figs. 1, 2), baggy (pl. XXIV, figs. 1, 2; pl. XXVI, figs. 2, 3) and tubular (pl. XXV, figs. 1, 2) forms, some forms also have pores. The tubular forms may also be found in colonies and forms with

2,5–3 мкм), схожие с терминальными гетероцистами или акинетами, характерными для цианобактерий, или со спорангиями актиномицет (табл. XIX, фиг. 2).

Микрофоссилии, интерпретированные как эукариотические формы, также можно разделить на несколько групп.

*Празиофиты.* Шарообразные (табл. XX, фиг. 1–3; табл. XXI, фиг. 1, 2; табл. XXII, фиг. 1; табл. XXIII, фиг. 1, 2), мешковидные (табл. XXIV, фиг. 1, 2; табл. XXVI, фиг. 2 и 3), а также трубковидные формы (табл. XXV, фиг. 1, 2), обладающие порами. Трубковидные формы могут образовывать колонии. Размер шарообразных форм варьирует от 7 до 15 мкм. Размер мешковидных форм – от ~17 до 35 мкм. Ширина внутренних полостей трубковидных форм 5–10 мкм; толщина стенки 2–4 мкм; стенка двойная, пронизанная радиальными каналами.

*Альвеолы.* Мешковидные формы с углублениями (табл. XXVI, фиг. 1 и 4).

*Раковинные амёбы.* Удлиненно-яйцевидная форма около 10 мкм длиной, до 5,5 мкм шириной (табл. XXVII, фиг. 1).

*Диатомеи.* В метеорите Оргей было обнаружено несколько узнаваемых целых панцирей диатомей, а также их фрагменты.

1) Два целых панциря, по-видимому, сохранились сразу после деления митотических клеток. Створки линейно-ланцетовидные с широко закругленными вершинами, а центральная область образует широкую поперечную фасцию. Измерения показывают ~15 трансапикальных бороздок на 10 мкм. Трансапикальные бороздки направлены к середине створки, но сходятся к вершинам (табл. XXVIII, фиг. 1).

Ориентация клеток не позволила получить хорошее изображение деталей структуры шва. Измерения СЭМ показывают:

Длина верхнего панциря: 15,63 мкм.

Длина нижнего панциря: 15,32 мкм.

Трансапикальные бороздки в 10 мкм: 15,36.

2) Панцирь пеннатной диатомеи, покрытый эпсомитом. Длина около 7 мкм, ширина около 4 мкм (табл. XXVIII, фиг. 2).

pores may be encountered among them. The size of spherical forms ranges from 7–15  $\mu\text{m}$ , and the size of the baggy forms is ~17–35  $\mu\text{m}$ . The diameter of inner cavities of the tubular forms differs from 5 to 10  $\mu\text{m}$ , their bilayer walls include radial canals and have thickness of 2–4  $\mu\text{m}$ .

*Alveolata.* Baggy forms with cavities (pl. XXVI, figs. 1, 4).

*Testate amoebae* characterized by elongated ovoid form, with length of about 10  $\mu\text{m}$  and diameters up to 5.5  $\mu\text{m}$  (pl. XXVII, fig. 1).

*Diatoms:* several recognizable complete frustules and fragments of diatoms have been discovered in the Orgueil meteorite.

1) Two complete frustules appear to have been preserved just after mitotic cell division. These valves are linear-lanceolate with broadly rounded apices and the central area forms a broad transverse fascia. The SEM measurements indicate there are ~15 transapical striae in 10  $\mu\text{m}$ . The transapical striae are radiate towards the middle of the valve, but they are convergent towards the apices (pl. XXVIII, fig. 1).

The orientation of the cells did not allow good images of details of the raphe structure. The SEM measurements indicate:

Upper Frustule Length: 15.63  $\mu\text{m}$ .

Lower Frustule Length: 15.32  $\mu\text{m}$ .

Transapical striae in 10  $\mu\text{m}$ : 15.36.

2) Frustule of the pennate diatom is covered with epsomite. Length ~7  $\mu\text{m}$ , width ~4  $\mu\text{m}$  (pl. XXVIII, fig. 2).

3) Half of a complete frustule of a pennate diatom (pl. XXIX, figs. 1–3). The thickness of the frustule is ~6 microns and the length of the remaining portion is ~14 micron indicating the complete diatom was ~20 microns long.

4) Fragment of a diatom with costae and areolae visible (pl. XXX, fig. 1).

5) Pennate diatom embedded in the rock matrix of the Orgueil meteorite. Length ~14  $\mu\text{m}$  (pl. XXXI, figs. 1–3).

*Forms of unclear systematic position.* Sack-shaped forms with wrinkled folds and pro-



3) Часть панциря в пеннатной диатомеи (табл. XXIX, фиг. 1–3). Толщина бороздки ~6 микрон, длина сохранившейся части составляет ~14 микрон, общая длина панциря могла составлять около 20 мкм.

4) Фрагмент диатомеи. Видны ребра и ареолы (XXX, фиг. 1).

5) Пеннатная диатомея, включенная в матрикс метеорита Оргей. Длина ~14 мкм (табл. XXXI, фиг. 1–3).

*Формы неясного систематического положения.* Мешковидные формы со складками смятия и отростками; предположительно акритархи (табл. XXXII, фиг. 1–3; табл. XXXIII, фиг. 1).

Сферические формы с отростком (две находки). Первый экземпляр (табл. XXXIII, фиг. 2) может представлять собой стенку, которая окружена кристаллами частично разрушенного фрамбоида (полая сфера диаметром около 19 мкм), стенка пор не имеет (толщина около 2–2,5 мкм), полость заполнена кристаллами магнетита. Второй, хорошо сохранившийся, меньший по размеру образец (табл. XXXIV, фиг. 1) сферической формы диаметром около 5 мкм, обладает хорошей степенью сохранности.

Мешковидные формы размером 8–12 мкм с желобком, напоминающим щель разверзания (табл. II, фиг. 2; табл. XXXIV, фиг. 2) или с ямками размером (табл. XXXV, фиг. 1–3; табл. XXXVI; фиг. 1–3; табл. XXXVII, фиг. 1).

Двусторонне-симметричный уплощенный объект эллипсоидальной формы, имеющий симметрично расположенные радиальные борозды. Длина около 10 мкм, ширина 6 мкм (табл. XXXVIII, фиг. 1–3).

Извитой морщинистый объект предположительно биогенного происхождения, напоминающий мятую и скрученную пленку, с высоким содержанием алюминия, как показано на двумерной рентгеновской карте. Размер около ~40×15 мкм (табл. XXXIX, фиг. 1, 2; табл. XL, фиг. 1).

cesses, possibly acritarchs (pl. XXXII, fig. 1–3; pl. XXXIII, fig. 1).

Spherical forms with a process (two finds). The first instance (pl. XXXIII, fig. 2) may represent a wall that enveloped by crystals of a partially destroyed framboid (hollow sphere with a diameter of about 19  $\mu\text{m}$ ), the wall has no pores (thickness of about 2–2.5  $\mu\text{m}$ ), the cavity was filled with magnetite crystals. The second, smaller, specimen (pl. XXXIV, fig. 1) is well-preserved and of spherical shape, with diameter ~5  $\mu\text{m}$ .

Sack-shaped forms 8–12  $\mu\text{m}$  microns in size with a groove resembling a crevice (pl. II, fig. 2; pl. XXXIV, fig. 2) or with fossae (pl. XXXV, figs. 1–3; pl. XXXVI, figs. 1–3; pl. XXXVII, fig. 1).

The bilaterally symmetric flattened form of ellipsoidal shape having symmetrically located radial grooves. Length ~10  $\mu\text{m}$ , width ~6  $\mu\text{m}$  (pl. XXXVIII, figs. 1–3).

A twisted wrinkled object of possible biogenic origin resembling a crumpled and twisted film with high content of Aluminum as shown in the 2D X-Ray Map. Size about ~40×15  $\mu\text{m}$  (pl. XXXIX, figs. 1, 2; pl. XL, fig. 1).



## Заключение

Предоставленная читателю работа по метеориту Оргей высветила три очень важных момента: во-первых, углистый метеорит Оргей представляет собой уникальное явление по обилию и разнообразию хорошо сохранившихся микрофоссилий, которые по совокупности четко отвечают на вопрос о проблеме происхождения жизни за пределами Земли и о безусловной состоятельности представления о панспермии. Во-вторых, сочетание микрофоссилий с данными минералогии и сильными биомаркерами, обнаруженными в Оргее за многие годы изучения разными авторами, не позволяют поставить под сомнение факт, что эти органические остатки индигенны и принадлежат телу Оргея, а не являются современными земными контаминантами. В-третьих, были продемонстрированы возможности сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией при поиске и анализе индигенных микрофоссилий в астроматериалах.

Представленный в Атласе материал демонстрирует присутствие в Оргее большого количества различных прокариот (в т. ч. кокковидных, палочковидных и нитевидных форм) и эукариот, в том числе пеннатных диатомей, прازیнофитов, акритархов, альвеолят, панцирных амёб и, возможно даже споры водорослей или грибов. Более того, нахождение в Оргее многочисленных эукариот, включая пеннатных диатомей и, возможно, спор, ставит очень сложный вопрос о происхождении этих форм и способах их попадания в тело Оргея.

## Conclusion

The presented work on the Orgueil meteorite highlighted three very important points. First, the Orgueil CII carbonaceous meteorite is a unique phenomenon in terms of the abundance and diversity of indigenous well-preserved microfossils providing a clear answer to the question of the origin of life outside the Earth, which is entirely consistent with the panspermia hypothesis. Second, the combination of the microfossils along with the mineralogy and strong biomarkers discovered in the Orgueil meteorite by various researchers over many years clearly demonstrate the fact that these organic remains belong to the body of the Orgueil meteorite and are indigenous fossils rather than modern terrestrial contaminants is no longer in doubt. Third, it has shown the value of Scanning Electron Microscopy combined with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy in the search for and validation of indigenous microfossils in Astromaterials.

The images presented in this Atlas also reveal the presence in Orgueil of a great abundance and diversity of prokaryotes (including coccoidal, rod-shaped and filamentous forms) and eukaryotes, including pennate diatoms, prasinophytes, acritarchs, alveolates, testate amoebas, and possibly even spores of algae or fungi. Moreover, the presence of various eukaryotes, such as pennate diatoms and possibly spores inside Orgueil raises a very difficult question of the origin of these forms and the ways of getting into the body of the meteorite.

Therefore, it seems possible that these clearly biological remains originated as a result of destruction of planets, icy moons, comets or other small solar system bodies on which they had developed in

В результате кажется достаточно вероятным происхождение этих форм при каком-то способе разрушения планетных тел, ледяных лун, комет или других малых объектов Солнечной системы, где они развивались в обстановках, близких к биосфере Земли. Также нельзя исключить существование морфологического единства фоссильных организмов, живших в водных средах обитания вне Земли. Это ставит вопрос о единообразном развитии биосфер разных планетных тел Солнечной системы и способов межпланетного переноса жизнеспособной микробиоты, органических соединений, наряду с ледяной / каменной эжекткой (т. е. лито- и криопанспермия). Таким образом, работа над изучением микрофоссилий Оргея, с одной стороны, показала, что жизнь не происходила на Земле, но, с другой стороны, ставит перед нами огромное количество вопросов и, возможно, нестандартных решений о происхождении и распространении жизни и биосфер.

Earth-like conditions. The existence of a morphological unity of fossilized organisms from aquatic environments outside of the Earth cannot be ruled out either. This raises the question of the possibility of the uniform development of biospheres on different planetary bodies of our Solar System or the transplanetary transfer of viable microbiota along with organic chemicals and rocky/icy ejecta and debris (e.g., litho- or cryo-panspermia). Thus, the study of the microfossils of the Orgueil meteorite not only showed that life did not originate on the Earth, but also posed a number of questions, and, possibly non-standard decisions regarding the origin and distribution of life and biospheres.

# Литература / References

- Астафьева М. М., Розанов А. Ю., Хувер Р.* 2005. Фрамбониды: их структура и происхождение // Палеонтологический журнал. № 5. С. 3–9.
- Астафьева М. М., Гентнер А. Р., Герасименко Л. М., Жегалло Е. А., Жмур С. И., Карпов Г. А., Орлеанский В. К., Пономаренко А. Г., Розанов А. Ю., Сумина Е. Л., Ушатинская Г. Т., Хувер Р., Школьник Э. Л.* 2011. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Научные редакторы: А. Ю. Розанов, Г. Т. Ушатинская. М.: ПИН РАН. С. 1–172.
- Жмур С. И., Розанов А. Ю., Горленко В. М.* 1997. Следы древнейшей жизни в космических телах Солнечной системы // Природа. № 8. С. 3–10.
- Розанов А. Ю.* 1996. Цианобактерии и, возможно, низшие грибы в метеоритах // Соросовский образовательный журнал. Т. 11. С. 61–65.
- Розанов А. Ю.* 2009. Псевдоморфозы по микробам в метеоритах // Проблемы происхождения жизни. Российская академия наук. Сборник научных статей / Отв. ред. А. Ю. Розанов, А. В. Лопатин, В. Н. Снытников. М.: ПИН РАН. С. 158–168.
- Тимофеев Б. В.* 1959. Древнейшая флора Прибалтики и ее стратиграфическое значение // Тр. ВНИГРИ. Вып. 129. С. 1–319.
- Aerts J. W., Elsaesser A., Roling W. F. M., Ehrenfreund P.* 2016. A contamination assessment of the CI carbonaceous meteorite Orgueil using a DNA-directed approach // Meteoritics & Planetary Science. V. 51. P. 920–931.
- Alexander C. M. O'D., Fogel M., Yabuta, H., Cody G. D.* 2007. The origin and evolution of chondrites recorded in the elemental and isotopic compositions of their macromolecular organic matter // Geochimica et Cosmochimica Acta. V. 71. P. 4380–4403.
- Amor M., Tharaud M., Gélabert A., Komeil A.* 2020. Single-cell determination of iron content in magnetotactic bacteria: implications for the iron biogeochemical cycle // Environmental Microbiology. V. 22. P. 823–831.
- Anders E.* 1962. Meteoritic hydrocarbons and extraterrestrial life // Ann. N.Y. Acad. Sci. V. 93. P. 649–664.
- Anders E., Fitch F.* 1962. Search for organized elements in carbonaceous chondrite // Science. V. 138. P. 1392–1399.
- Anders E., DuFresne E. R., Hayatsu R., Cavaillé A., DuFresne A., Fitch F. W.* 1964. Contaminated Meteorite // Science. V. 27. P. 1157–1161.
- Aponte J. C., Dworkin J. P., Elsila J. E.* 2015. Indigenous aliphatic amines in the aqueously altered Orgueil meteorite // Meteoritics & Planetary Science. V. 50. P. 1733–1749.
- Arrhenius S.* 1908. Worlds in the making: The evolution of the universe. London. Harper & Row. P. 1–230.
- Astafieva M. M., Rozanov A. Yu., Hoover R. M.* 2004. Framboids: Their structure and origin // Paleontol. Journ. V. 39. P. 457–464.
- Bada J. L.* 1971. Kinetics of the nonbiological decomposition and racemization of amino acids in natural waters // Nonequilibrium Systems in Natural Water Chemistry / J. D. Hem and R. F. Gould (eds). Advan. Chem. Ser. No. 106, American Chemical Society, Washington, D.C. P. 309–331.
- Bada J. L.* 1991. Amino acid cosmogeochemistry // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Ser. B: Biological Sciences. V. 333. P. 349–358.
- Bass M. N.* 1971. Montmorillonite and serpentine in Orgueil meteorite // Geochim. Cosmochim. Acta. V. 35. P. 139–147.
- Berthelot M. P. E.* 1868. Sur la matière charonneuse des meteorites // Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences. V. 67. P. 849.

- Bitz S. M. C., Nagy B. 1966. Ozonolysis of “polymer-type” material in coal, kerogen and in the Orgueil meteorite: a preliminary report // Proc. National Academy of Sciences of the United States of America. V. 56. № 5. P. 1383.
- Boström K., Frederickson K. 1966. Surface Conditions of the Orgueil Meteorite Parent Body as Indicated by Mineral Associations // Smithsonian Misc. Coll. V. 151. P. 1–39.
- Botan E. A. 1965. Examination of “Organized Elements” from the Orgueil Meteorite by Quantitative Fluorescence Microscopy // Aerospace Medicine. V. 36. P. 1069–1076.
- Botta O., Ehrenfreund P., Glavin D. P., Cooper G. W., Kminek G., Bada J. L. 2000. A Cometary Origin of the Amino Acids in the Orgueil Meteorite. Lunar and Planetary Science XXXI. P. 1–2.
- Briggs M. H. 1963. Organic extracts of some carbonaceous meteorites // Life Sciences. V. 2. № 1. P. 63–68.
- Bunch T. E., Chang S. 1980. Carbonaceous chondrites-II. Carbonaceous chondrite phyllosilicates and light element geochemistry as indicators of parent body processes and surface conditions // Geochim. Cosmochim. Acta. V. 44. P.1543–1577.
- Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F. 1957. Synthesis of the Elements in Stars // Rev. Modern Physics. V. 29. P. 547–650.
- Burton A. S., Stern J. C., Elsila J. E., Glavin D. P., Dworkin J. P. 2012. Understanding prebiotic chemistry through the analysis of extraterrestrial amino acids and nucleobases in meteorites // Chem. Soc. Rev. V. 41. P. 5459–5472.
- Cann J. H., Murray-Wallace C. V. 1986. Holocene distribution and amino acid racemisation of the benthic foraminifer *Massilina milletti*, northern Spencer Gulf, South Australia // Alcheringa. V. 10. P. 45–54.
- Chang S., Mack R., Lemon K. 1978. Carbon chemistry of separated phases of Murchison and Allende meteorites. In Lunar and Planetary Science Conference. V. 9. P. 157–159.
- Claus G., Nagy, B. 1961. A microbiological examination of some carbonaceous meteorites // Nature. V. 192. P. 594–596.
- Claus G., Nagy B., Europa D. L. 1963. Further observations on the properties of the “organized elements” // Ann. N.Y. Acad. Sci. V. 108. P. 580–605.
- Cloëz S. 1864a. Analyse chimique de la pierre météorique d’Orgueil // Compt. Rend. Acad. Sci. V. 59. P. 37–40.
- Cloëz S. 1864b. Note sur la composition chimique de la pierre météorique d’Orgueil // Compt. Rend. Acad. Sci. V. 58. P. 986–988.
- Commins B. T., Harrington J. S. 1966. Polycyclic aromatic hydrocarbons in carbonaceous meteorites // Nature. V. 212. P. 273–274.
- Cooper G., Kimmich N., Belisle W., Sarinana J., Brabham K., Garrel L. 2001. Carbonaceous meteorites as a source of sugar-related organic compounds for the early Earth // Nature. V. 414. P. 879–883.
- Connelly J. N., Amelin Y., Krot A. N., Bizzarro M. 2008. Chronology of the Solar System’s Oldest Solids // The Astrophysical Journal Letters. V. 675. P. L121–L124.
- Cronin J. R., Pizzarello S., Frye J. S. 1987. C-13 NMR-spectroscopy of the insoluble carbon of carbonaceous chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. V. 51. P. 299–303.
- Cronin J. R., Pizzarello S. 1997. Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids. Science // V. 275. P. 951–955.
- Cuadros J. 2017. Clay minerals interaction with microorganisms: a review // Clay Minerals. V. 52. P. 235–261.
- Daubrée G.-A. 1864a. Communication de M. Daubrée, d’après sa correspondance et celle de M. Le Verrier // Compt. Rend. Acad. Sci. V. 58. P. 932–937.
- Daubrée G.-A. 1864b. Nouveaux renseignements sur le bolide du 14 mai 1864 // Compt. Rend. Acad. Sci. V. 58. P. 1065–1072.
- Daubrée G. A., Le Verrier M. 1864. Communication // Compt. Rend. Acad. Sci. V. 58. P. 932.
- DuFresne E. P., Anders E. 1962. On the Chemical Evolution of carbonaceous chondrites // Geochim. Cosmochim. Acta. V. 26. P. 1085–1114.
- Ehrenfreund P., Glavin D. P., Botta O., Cooper G., Bada J. 2001. Extraterrestrial amino acids in Orgueil and Ivuna: Tracing the parent body of CI type carbonaceous chondrites // Proc. of the National Academy of Sciences. V. 98. № 5. P. 2138–2141.
- Endress M., Bischoff A. 1993. Mineralogy, degree of brecciation, and aqueous alteration of the CI chondrites Orgueil, Ivuna and Alais // Meteoritics. V. 28. P. 345–346.
- Endress M., Bischoff A. 1996. Carbonates in CI chondrites: Clues to parent body evolution // Geochim. et Cosmochim. Acta V. 60. P. 489–507.
- Engel M. H., Nagy B. 1982. Distribution and enantiomeric composition of amino acids in the Murchison meteorite // Nature. V. 296. № 5860. P. 837–840.
- Engel M. H., Macko S. A., Silfer J. A. 1990. Carbon isotope composition of individual amino acids in the Murchison meteorite // Nature. V. 348. P. 47–49.
- Engel M. H., Macko S. A., Nagy B. 1993. The Organic Geochemistry of Carbonaceous Meteorites:

- Amino Acids and Stable Isotopes // Organic Geochemistry Principles and Applications / M. H. Engel and S. A. Macko (eds). Springer Science. Topics in geobiology. V. 11. P. 685–695.
- Engel M. H., Macko S. A. 1997. Isotopic evidence for extraterrestrial non-racemic amino acids in the Murchison meteorite. // *Nature*. V. 389. P. 265–268.
- Engel M. E., Macko S. A. 2001. The stereochemistry of amino acids in the Murchison meteorite // *Precambrian Res.* V. 106. P. 35–45.
- Engel M. E., Andrus V. E., Macko S. A. 2005. Amino Acids as Probes for Life's Origin in the Solar System // In *Perspectives in Astrobiology*. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences / R. B. Hoover, R. Paeppe, A. Yu. Rozanov (eds). IOS Press, Amsterdam. V. 366. P. 25–37.
- Fagerbakke K. M., Heldal M., Norland S. 1996. Content of carbon, nitrogen, oxygen, sulfur and phosphorus in native aquatic and cultured bacteria // *Aquatic Microbial Ecology*. V. 10. P. 15–27.
- Fitch F. W., Schwarz H. P., Anders E. 1962. Organized elements in carbonaceous chondrites // *Nature*. V. 193. P. 1123–1125.
- Fitch F. W., Anders E. 1963a. Organized element: possible identification in Orgueil meteorite // *Science* V. 140. P. 1097–1099.
- Fitch F. W., Anders E. 1963b. Observations of the nature of “organized elements” in carbonaceous chondrites // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* V. 108. P. 495–513.
- Folsome C. E., Lawless J. G., Romiez M., Ponnaemperuma C. 1973. Heterocyclic compounds recovered from carbonaceous chondrites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. V. 37. P. 455–465.
- Fredriksson K., Kerridge J. F. 1988. Carbonates and sulfates in CI Chondrites: Formation by aqueous activity on the parent body // *Meteoritics*. V. 23. P. 35–44.
- Furukawa Y., Chikaraishi Y., Ohkouchi N., Ogawa N. O., Glavin D. P., Dworkin J. P., Abe C., Nakamura T. 2019. Extraterrestrial ribose and other sugars in primitive meteorites // *Proc. National Academy of Sciences*. V. 116. P. 24440–24445.
- Galimov E. M. 1985. *The Biological Fractionation of Isotopes* New York. Academic Press. P. 1–261.
- Gelpi E., Oró J. 1970. Organic compounds in meteorites—IV. Gas chromatographic-mass spectrometric studies on the isoprenoids and other isomeric alkanes in carbonaceous chondrites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. P. 34. № 9. P. 981–994.
- Gerasimenko L. M., Hoover R. B., Rozanov A. Yu., Zhegallo E. A., Zhmur S. I. 1999. Bacterial Paleontology and Studies of Carbonaceous Chondrites // *Paleontol. Journ.* № 33. P. 439–459.
- Glavin D. P., Alexander C. M. O'D., Aponte J. C., Dworkin J. P., Elsila J. E., Yabuta H. 2018. The Origin and Evolution of Organic Matter in Carbonaceous Chondrites and Links to Their Parent Bodies // *Primitive Meteorites and Asteroids: Physical, Chemical and Spectroscopic Observations Paving the Way to Exploration*. Elsevier. P. 205–271.
- Glavin D. P., Elsila J. E., McLain H. L., Aponte J. C., Parker E. T., Dworkin J. P., Hill D. H., Connolly Jr. H. C., Lautetta D. S. 2020a. Evidence for Extraterrestrial L-Amino Acid Excesses in the CM2 Aguas Zarcas and Murchison Carbonaceous Chondrites: Predictions for Ryugu and Bennu // *51st Lunar and Planetary Science Conference*. P. 1–2.
- Glavin D. P., Elsila J. E., McLain H. L., Aponte J. C., Parker E. T., Dworkin J. P., Hill D. H., Connolly Jr. H. C., Lautetta D. S. 2020b. Extraterrestrial amino acids and L-enantiomeric excesses in the CM 2 carbonaceous chondrites Aguas Zarcas and Murchison // *Meteoritics and Planetary Science*. Online 25 February 2020. <https://doi.org/10.1111/maps.13451>
- Gounelle M. 2006. The meteorite fall at l'Aigle and the Biot report: Exploring the cradle of Meteoritics // *The history of meteoritics and key meteorite collections: Fireballs, finds and falls / G. J. H. McCall, A. J. Bowden, R. J. Howarth (eds) Geological Society. Spec. Publ. P. 73–89.*
- Gounelle M., Spurný P., Bland P. A. 2006. The orbit and atmospheric trajectory of the Orgueil meteorite from historical records // *Meteoritics & Planetary Science*. V. 41. P. 135–150.
- Gounelle M., Morbidelli A., Bland P. A., Spurný P., Young E. D., Sephton M. 2008. Meteorites in the Outer Solar System // *The Solar System beyond Neptune / M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank & A. Morbidelli (eds) Arizona Univ. Press. P. 525–541.*
- Gounelle M. 2011. The Asteroid–Comet Continuum: In Search of Lost Primitivity // *Elements*. V. 7. P. 29–34.
- Gounelle M., Zolensky M. E. 2014. The Orgueil meteorite: 150 years of history // *Meteoritics & Planetary Science*. V. 49. № 10. P. 1769–1794.
- Hartogh P., Lis D. C., Bockelée-Morvan D., de Val-Borro M., Biver N., Küppers M., Emprechtinger M., Bergin E. A., Crovisier J., Rengel M., Moreno R., Sztutowicz S., Blake G. A. 2011. Ocean-like water in the Jupiter-Family comet 103/P Hartley 2 // *Nature*. V. 478. P. 218–220.
- Hayatsu R. 1964. Orgueil meteorite: organic nitrogen contents // *Science*. V. 146. № 3649. P. 1291–1293.



- Hayatsu R., Studier M. H., Oda A., Fuse K., Anders E. 1968. Origin of organic matter in the Solar System-II: Nitrogen Compounds // *Geochem. Cosmochim. Acta* 3. V. 2. P. 175–190.
- Hayatsu R., Matsuoka S., Scott R.G., Studier M.H., Anders E. 1977. Origin of organic-matter in early solar-system – VII. Organic polymer in carbonaceous chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. V. 41. P. 1325–1339.
- Heck P. R., Greer J., Kööp L., Trappitsch R., Gyngard F., Busemann H., Maden C., Avila J. N., Davis A. M., Wieler R. 2020. Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide // *Proc. of the National Academy of Sciences*. V. 117. P. 1884–1889.
- Hermann K. M. 1995. The shikimate pathway as an entry to aromatic secondary metabolism // *Plant Physiology*. V. 107. P. 7–12.
- Hodgson G. W., Baker B. L. 1964. Evidence for porphyrins in the Orgueil meteorite // *Nature*. V. 202. № 4928. P. 125–131.
- Hodgson G. W., Baker B. L. 1969. Porphyrins in meteorites: metal complexes in Orgueil, Murray, Cold Bokkveeld and Mokoia carbonaceous chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. V. 33. P. 943–958.
- Hoover R. B., Hoyle F., Wallis M. K., Wickramasinghe N. C. 1986a. Can Diatoms Live on Cometary Ice? in *Asteroids, Comets and Meteors II* / C. I. Lagerkvist (ed.). P. 359–352.
- Hoover R. B., Hoyle F., Wickramasinghe N. C., Hoover M. J., Al-Mufti S. 1986b. Diatoms on Earth, Comets, Europa, and in Interstellar Space // *Earth, Moon, and Planets*. V. 35. P. 19–45.
- Hoover R. B. 1997. Meteorites, Microfossils and Exobiology // *Proc. SPIE*. V. 3111. P. 115–136.
- Hoover R. B., Rozanov A. Yu., Zhmur S. I., Gorlenko V. M. 1998. Further evidence of Microfossils in Carbonaceous Chondrites // *Proc. SPIE*. V. 3441. P. 203–216.
- Hoover R. B., Rozanov A. Yu. 1999. Biomorphmic Microstructures in Mighei Carbonaceous Meteorite // *Proc. SPIE*. V. 3755. P. 120–130.
- Hoover R. B., Rozanov A. Yu. 2001. Evidence for Biomarkers and Microfossils in Ancient Rocks and Meteorites // *Proc. SPIE*. V. 4273. P. 15–32.
- Hoover R. B., Jerman G., Rozanov A. Yu., Davies P. C. W. 2003. Biomarkers and Microfossils in the Murchison, Rainbow, and Tagish Lake meteorites // *Proc. SPIE*. V. 4859. P. 15–31.
- Hoover R. B., Rozanov A. Yu., Jerman G., Costen J. 2004a. Microfossils in CI and CO Carbonaceous Meteorites // *Proc. SPIE*. V. 5163. P. 7–22.
- Hoover R. B., Jerman G., Rozanov A. Yu., Sipiera P. P. 2004b. Indigenous microfossils in carbonaceous meteorites // *Proc. SPIE*. V. 5555. P. 1–17.
- Hoover R. B. 2005. Mineralized Remains of Morphotypes of Filamentous Cyanobacteria in Carbonaceous Meteorites // *Proc. SPIE*. V. 5906. P. 5906J\_1–17.
- Hoover R. B., Rozanov A. Yu. 2005. Microfossils, Biominerals and Chemical Biomarkers in Meteorites // In *Perspectives in Astrobiology*. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences / R. B. Hoover, R. R. Paepe, A. Yu. Rozanov (eds). IOS Press. Amsterdam. V. 366. P. 1–240.
- Hoover R. B. 2006a. Comets, carbonaceous meteorites and the origin of the biosphere // *Biogeosci. Discuss.* № 3. P. 23–70.
- Hoover R. B. 2006b. Fossils of Prokaryotic microorganisms in the Orgueil meteorite // *Proc. SPIE* V. 6309. P. 1–18.
- Hoover R. B. 2007a. Ratios of biogenic elements for distinguishing recent from fossil microorganisms // *Proc. SPIE* V. 6694. P. 669640D-1-20.
- Hoover R. B. 2007b. Microfossils of cyanobacteria in carbonaceous meteorites // *Proc. SPIE*. V. 6694. P. 669408-1-18.
- Hoover R. B. 2008a. Comets, Carbonaceous Meteorites and the Origin of the Biosphere // *Biosphere Origin and Evolution* / N. Dobretsov, N. Kolchanov, A. Rozanov, G. Zavarzin (eds). Springer US. N.Y. P. 55–68.
- Hoover R. B. 2008b. Microfossils of filamentous prokaryotes in CII and CM2 meteorites // *Proc. SPIE* V. 7097. P. 709–703.
- Hoover R. B. 2009. Microfossils in Carbonaceous meteorites // *Proc. SPIE*. V. 7441. P. 744103\_1-19.
- Hoover R. B. 2010. Chiral Biomarkers and Microfossils in Carbonaceous Meteorites // *Proc. SPIE*. V. 7819. 7819\_03-15.
- Hoover R. B. 2011. Fossils of Cyanobacteria in CII Carbonaceous Meteorites: Implications to Life on Comets, Europa, and Enceladus // *Journ. Cosmology*. V. 13. № 35. <http://cosmology.com/Life102.html>
- Hoover R. B. 2014. Microfossils and biomolecules in carbonaceous meteorites: possibility of life in water-bearing asteroids and comets // *Proc. SPIE*. V. 9226. P. 1–16.
- Hoover R. B., Rozanov A. Yu., Krasavin E.A., Ryumin A. K., Kapralov M. I. 2018. Diatoms in the Orgueil Meteorite // *Paleontol. Journ.* V. 52. № 13. P. 1647–1650.
- Horneck G., Bücker H., Reitz G. 1994. Long-term survival of bacterial spores in space // *Advances in Space Research*. V. 14. № 10. P. 41–45.
- Hoyle F. 1946. The synthesis of the elements from hydrogen // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. V. 106. P. 343–383.

- Hua L. L., Kobayashi K., Ochiai E. I., Gehrke C. W., Gerhardt K. O., Ponnampereuma C. 1986. Identification and quantification of nucleic acid bases in carbonaceous chondrites // *Origins of Life*. V. 16. P. 226–227.
- Huss G. R., Hutcheon I. D., Wasserburg G. J., Stone J. 1982. Presolar (?) Corundum in the Orgueil Meteorite // *LPSC*. V. 23. P. 563–564.
- Jedwab J. 1971. La Magnétite de la Météorite D'Orgueil Vue au Microscope Électronique à Balayage // *Icarus* 35. V. 3. P. 19–340.
- Jollois M. 1864. Lettre de M. Jollois à M. Le Verrier, Blois, le 20 Mai 1864 // *Compt. Rend. Acad. Sci.* V. 58. P. 936–937.
- Kaplan I. R., Degens E. T., Reuter J. H. 1963. Organic compounds in stony meteorites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. V. 27. № 7. P. 805–834.
- Kaufman D. S., Miller G. H. 1992. Overview of Amino Acid Geochronology // *Comparative Biochemistry and Physiology*. V. 102B. № 2. P. 199–204.
- Kawaguchi Y., Shibuya M., Kinoshita I., Yatabe J., Narumi I., Shibata H., Hayashi R., Fujiwara D., Murano Y., Hashimoto H., Imai E., Kodaira S., Uchihori Y., Nakagawa K., Mita H., Yokobori Sh., Yamagishi A. 2020. DNA Damage and Survival Time Course of Deinococcal Cell Pellets During 3 Years of Exposure to Outer Space // *Frontiers in Microbiology*. V. 11. P. 2050\_1-11.
- Kerridge J. F. 1970. Some observations on the nature of magnetite in the Orgueil meteorite // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 9. P. 299–306.
- Kerridge J. F., MacKay A.L., Boynton W.V. 1979. Magnetite in CI carbonaceous meteorites: Origin by aqueous activity on a planetesimal surface // *Science*. V. 205. P. 395–397.
- Kimura M., Sato T., Nakamura N., Nozawa J., Nakamura T., Tsukamoto K., Yamamoto K. 2013. Vortex magnetic structure in framboidal magnetite reveals existence of water droplets in an ancient asteroid // *Nature Geoscience*. V. 4. P. 2649–2656.
- Kissin Y. V. 2003. Hydrocarbon components in carbonaceous meteorites // *Geochimica et cosmochimica acta*. V. 67. P. 1723–1735.
- Kvenvolden K., Lawless J., Pering K., Peterson E., Flores J., Ponnampereuma C., Kaplan I. R., Moore C. 1970. Evidence for Extraterrestrial Amino-acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite // *Nature*. V. 228. P. 923–926.
- Kvenvolden K. 1975. Advances in the geochemistry of amino acids // *Ann. Rev. of Earth and Planetary Sciences*. V. 3. P. 183–212.
- Kvenvolden K. A., Blunt N. J., Clifton H. E. 1979. Amino acid racemization in Quaternary shell deposits at Willapa Bay, Washington // *Geochimica et cosmochimica acta*. V. 43. P. 1505–1520.
- Lawless J. G., Kvenvolden K. A., Peterson E., Jarosewich E. J. 1972. Physical sciences: Evidence for amino-acids of extraterrestrial origin in the Orgueil meteorite // *Nature*. V. 236. P. 66–67.
- Leymerie A. 1864a. Sur l'aérolithe d'Orgueil, tombé le 14 mai 1864, a 8 heures du soir // *Compt. Rend. de l'Academie des Sciences Paris*. V. 58. P. 988–990.
- Leymerie A. 1864b. Written communication with Mr. Daubrée // *Compt. Rend. de l'Academie des Sciences Paris*. V. 58. P. 982–988.
- Leymerie A. 1864c. Written communication with Mr. Daubrée // *Compt. Rend. de l'Academie des Sciences Paris*. V. 58. P. 1072.
- Leymerie A. 1864d. Notice sur un essai météoritique tombé aux environs d'Orgueil et de Campsas (Tarn-et-Garonne) le 14 mai 1864 précédée de quelques notions générales sur les aérolithes, les bolides et les étoiles filantes. Toulouse: E. Connac, Delpon et Co.
- Lindahl T. 1993. Instability and decay of the primary structure of DNA // *Nature*. V. 362. P. 709–715.
- McKay D. S., Gibson E. K. Jr., Thomas-Keptra K. L., Vali H., Romanek C. S., Clemett S. J., Chillier X. D., Maechling C. R., Zare R. N. 1996. Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001 // *Science*. V. 273. Iss. 5277. P. 924–029.
- McKeegan et al. 2006. Isotopic Compositions of Cometary Matter Returned by Stardust // *Science*. V. 314. P. 1724–1728.
- McSween H. L., Huss G. R. 2010. *Cosmochemistry* // Cambridge Univ. Press. Cambridge. P. 124.
- Meinschein W. G., Nagy B., Hennessy D. J. 1963. Evidence in meteorites of former life: the organic compounds in carbonaceous chondrites are similar to those found in marine sediments // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* V. 108. № 2. P. 553–579.
- Mileikowsky C., Cucinotta F. A., Wilson J. W., Gladman B., Horneck G., Lindegren L., Melosh J., Rickman H., Valtonen M., Zheng J. Q. 2000. Natural transfer of microbes in space; 1. from Mars to Earth and Earth to Mars // *Icarus*. V. 45. P. 391–427.
- Mitterer R. M. 1993. The Diagenesis of Proteins and Amino Acids in Fossil Shells // *Organic Geochemistry Principles and Applications* / M. H. Engel and S. A. Macko (eds). Springer Science. Topics in geobiology. V. 11. P. 739–754.
- Nakamura T., Noguchi T., Tsuchiyama A., Ushikubo T., Kita N. T., Valley J. W., Zolensky M. E., Kakazu Y., Sakamoto K., Mashio E., Uesugi K., Nakano T. 2008. Chondrulelike objects in short-period comet 81P/Wild 2 // *Science*. V. 321. P. 1664–1667.
- Nagy B., Meinschein W. G., Hennessy, D. J. 1961. Mass spectroscopic analysis of the Orgueil meteorite: Evidence for biogenic hydrocarbons // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* V. 93. P.25-35.

- Nagy B., Bitz M. C. 1963. Long-chain fatty acids in the Orgueil meteorite // *Arch. Biochem Biophys.* V. 101. № 2. P. 240–248.
- Nagy B., Frederickson K., Urey H. C., Kudynowski J., Claus G., Andersen C. A., Percy J. 1963. Electron probe microanalysis of organized elements in the Orgueil meteorite // *Nature.* V. 198. P. 121–125.
- Nagy B., Murphy M. T., Modzeleski V. E., Rouser G., Claus G., Hennessy D. J., Colombo U., Gazzarrini F. 1964. Optical activity in saponified organic matter isolated from the interior of the Orgueil meteorite // *Nature.* V. 202. № 4929. P. 228–233.
- Nagy B. 1975. Carbonaceous meteorites. N.Y. Elsevier Sci. Publ. Co. P. 1–747.
- Nesvorný D., Jenniskens P., Levison H. F., Bottke W. F., Vokrouhlický D., Gounelle M. 2010. Cometary origin of the zodiacal cloud and carbonaceous micrometeorites. Implications for hot debris disks // *Science.* V. 713. P. 816–636.
- Nguyen A. N., Messenger S. 2011. Presolar History Recorded in Extraterrestrial Materials // *Elements.* V. 7. № 1. P. 17–22.
- Nier A. O., Gulbransen E. A. 1939. Variations in the Relative Abundance of the Carbon Isotopes // *Journ. American Chemical Society.* V. 61. P. 697–698.
- Nooner D. W., Oró J. 1967. Organic compounds in meteorites—I. Aliphatic hydrocarbons // *Geochim. Cosmochim. Acta.* V. 31. № 9. P. 1359–1394.
- Olson R. J., Oró J., Zlatkis A. 1967. Organic compounds in meteorites—II Aromatic hydrocarbons // *Geochim. Cosmochim. Acta.* V. 31. P. 1935–1948.
- Oró J., Tornabene T. 1965. Bacterial Contamination of Some Carbonaceous Meteorites // *Science.* V. 150. P. 1046–1048.
- Oró J., Gelpi E. 1969. Gas-chromatographic mass-spectrometric studies on the isoprenoids and other isomeric alkanes in meteorites // *Meteorite Research / P. M. Millman (ed.). Springer. Dordrecht.* P. 518–523.
- Oró J., Nooner D. W., Zlatkis A., Wikstrom S. A. 1966. Paraffinic hydrocarbons in the Orgueil, Murray, Mokoia and other meteorites // *Life Sciences Space Research.* V. 4. P. 63–100.
- Oró J., Gibert J., Lichtenstein H., Wikstrom S., Flory D. A. 1971. Amino-acids, aliphatic and aromatic hydrocarbons in the Murchison meteorite // *Nature.* V. 230. № 5289. P. 105–106.
- Palik P. 1962. Further life-forms in the Orgueil meteorite // *Nature.* V. 194. P. 1065.
- Peeters Z., Botta O., Charnley S. B., Ruiterkamp R., Ehrenfreund P. 2003. The Astrobiology of Comets // *Astrophysical Journ.* V. 593. P. L129–L132.
- Peters K. E., Moldowan J. M. 1993. The Biomarker Guide: Interpreting Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. Englewood Cliffs. NJ. Prentice Hall. P. 1–363.
- Pisani F. 1864. Étude chimique et analyse de l'aérolithe d'Orgueil // *Compt. Rend. Acad. Sci.* V. 59. P. 132–135.
- Pizzarello S., Zolensky M., Turk K. A. 2003. Non racemic isovaline in the Murchison meteorite: chiral distribution and mineral association // *Geochim. Cosmochim. Acta.* V. 67. P. 1589–1595.
- Pizzarello S., Cooper G. W., Flynn G. J. 2006. The Nature and Distribution of the Organic Material in Carbonaceous Chondrites and Interplanetary Dust Particles // in *Meteorites and the Early Solar System II (Space Science Series) / Dante S. Lauretta, Harry Y. McSween Jr. (eds).* P. 625–651.
- Pizzarello S., Huang Y., Alexandre M. R. 2008. Molecular asymmetry in extraterrestrial chemistry: insights from a pristine meteorite // *Proc. National Academy of Sciences.* V. 105. P. 3700–3704.
- Pizzarello S., Holmes W. 2009. Nitrogen-containing compounds in two CR2 meteorites: <sup>15</sup>N composition, molecular distribution and precursor molecules // *Geochim. Cosmochim. Acta.* V. 73. P. 2150–2162.
- Pizzarello S., Shock E. 2010. The Organic Composition of Carbonaceous Meteorites: The Evolutionary Story Ahead of Biochemistry // *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology.* V. 2. P. 1–19.
- Redfield A. C. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton // *James Johnstone Memorial Volume.* P. 176–192.
- Robert F., Gautier D., Dubrulle B. 2000. The Solar System D/H ratio: Observations and Theories // *Space Sci. Rev.* V. 92. P. 201–224.
- Roling W. F., Head I. M. 2005. Prokaryotic systematics: PCR and sequence analysis of amplified 16S rRNA genes // *Molecular Microbiology Ecology / A. M. Osborn, C. J. Smith (eds).* N.Y. Taylor and Francis. P. 25–64.
- Rossignol-Strick M., Barghoorn E. S. 1971. Extraterrestrial abiogenic organization of organic matter: The hollow spheres of the Orgueil meteorite // *Space Life Sci.* V. 3. P. 89–107.
- Rossignol-Strick M., Hoover R. B., Jerman G., Coston J. 2005. The hollow spheres of the Orgueil meteorite: a re-examination // *Proc. SPIE.* V. 5906. P. 59060M\_1-11.
- Rozanov A. Yu., Hoover R. B. 2004. Atlas of Bacteriomorphs in Carbonaceous Chondrites // *Proc. SPIE.* V. 5163. P. 23–35.
- Rozanov A. Yu., Hoover R. B. 2013. Acritarchs in carbonaceous meteorites and terrestrial rocks // *Proc. SPIE.* V. 8865. P. 886507\_1-11.



- Saiki R. K., Gelfand D. H., Stoffel S., Scharf S. J., Higuchi R., Horn G. T., Mullis K. B., Erlich H. A. 1988. Primer-directed enzymatic amplification of DNA with a thermostable DNA polymerase // *Science*. V. 239. P. 487–491.
- Schidlowski M. 1987. Application of Stable Carbon Isotopes to Early Biochemical Evolution on Earth // *Ann. Rev. Earth and Planetary Science*. V. 15. P. 47–72.
- Schidlowski M. 2005. Paleobiological and Biogeochemical Vestiges of Early Terrestrial Biota: Baseline for Evaluation of Extraterrestrial Evidence // *Perspectives in Astrobiology*. NATO Science Series: Life and Behavioural Sciences / R. B. Hoover, R. R. Paeppe, A. Yu. Rozanov (eds). IOS Press. Amsterdam. P. 148–169.
- Schroeder R. A., Bada J. L. 1976. A review of the geochemical applications of the amino acid racemization reaction // *Earth Science Review*. V. 12. P. 347–391.
- Schopf J. W., Kvenvolden K. A., Barghoorn E. S. 1968. Amino acids in Precambrian sediments: an assay // *Proc. National Academy of Sciences*. V. 59. P. 639–646.
- Sephton M. A. 2002. Organic compounds in carbonaceous meteorites // *Natural Product Reports*. V. 19. P. 292–311.
- Schmitt-Kopplin P., Gabelica Z., Gougeon R. D., Fekete A., Kanawati B., Harir M., Gebefuegi I., Eckel G., Hertkorn N. 2010. High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall // *Proc. National Academy of Sciences*. V. 107. P. 2763–2768.
- Staplin F. L. 1962. Microfossils from the Orgueil meteorite // *Micropaleontology*. V. 8. P. 343–347.
- Stoks P. G., Schwartz A. W. 1979. Uracil in carbonaceous meteorites // *Nature*. V. 282. P. 709–710.
- Tan W. C., VanLandingham S. L. 1967. Electron microscopy of biological-like structures in the Orgueil carbonaceous meteorite // *Geophys. Journ. Royal Astr. Soc.* V. 12. P. 237.
- Timofeev B. V. 1963. Lebensspuren in Meteoriten: Resultate einer microphytologischen analyse // *Grana. Paly nol.* V. 4. P. 92–99.
- Tomeoka K., Buseck P. R. 1988. Matrix mineralogy of the Orgueil C1 carbonaceous chondrite // *Geochim. Cosmochim. Acta*. V. 52. P. 1627–1640.
- Urey H. C. 1966. Biological Material in Meteorites: A Review // *Science*. V. 151. P. 157–166.
- VanLandingham S. L. 1965. Evidence for microfossils in the Alais and Orgueil carbonaceous meteorite // *Nature*. V. 208. P. 947–948.
- VanLandingham S. L., Sun C. N., Tan W. C. 1967. Origin of round body structures in the Orgueil meteorite // *Nature*. V. 216. P. 252–253.
- Wassmann M., Moeller R., Rabbow E., Panitz C., Horneck G., Reitz G., Douki T., Cadet J., Stan-Lotter H., Cockell S. S., Rettberg P. 2012. Survival of spores of the UV-resistant *Bacillus subtilis* strain MW01 after exposure to low-earth orbit and simulated martian conditions: data from the space experiment ADAPT on EXPOSE-E // *Astrobiology*. V. 12. P. 498–507.
- Wehmiller J. F. 1993. Applications of Organic Geochemistry for Quaternary Research: Aminostratigraphy and Aminochemistry // *Organic Geochemistry Principles and Applications* / M. H. Engel, S. A. Macko (eds). Springer Science. Topics in geobiology. V. 11. P. 755–798.
- Wickramasinghe N. C., Wickramasinghe J. T., Wallis J., Hoover R. B., Rozanov A. Yu. 2012. Comets as Parent Bodies of CII Carbonaceous Meteorites and Possible Habitats of Ice-Microbes // *Proc. SPIE*. V. 8521. P. 85210Q-1–85210Q-17.
- Wickramasinghe N. C., Wickramasinghe D. T., Steele E. J. 2018. Comets, Enceladus and panspermia // *Astrophys. Space Sci.* V. 363. Iss. 12. P. 244\_1–7.
- White L. F., Tait K. T., Langelier B., Lymer E. A., Černok A., Kizovski T. V., Ma C., Tschauner O., Nicklin R. I. 2020. Evidence for sodium-rich alkaline water in the Tagish Lake parent body and implications for amino acid synthesis and racemization // *Proc. National Academy of Sciences*. V. 117. P. 11217–11219.
- Worth R. J., Sigurdsson S., House C. H. 2013. Seeding life on the moons of the outer planets via lithopanspermia // *Astrobiology*. V. 13. P. 1155–1165.
- Yamagishi A., Kawaguchi Y., Hashimoto H., Yano H., Imai E., Kodaira S., Uchihori Y., Nakagawa K. 2018. Environmental data and survival data of *Deinococcus aetherius* from the exposure facility of the Japan experimental module of the International Space Station obtained by the Tanpopo mission // *Astrobiology*. V. 18. P. 1369–1374.
- Zaikowski A. 1979. Infrared spectra of the Orgueil (C-1) chondrite and serpentine minerals // *Geochim. Cosmochim. Acta*. V. 43. P. 943–945.

# Фототаблицы / Plates



## Т а б л и ц а I

Кристалл магнетита, метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/3, Au-Pd напыление.

Фиг. 1. Кристалл магнетита, кубическая сингония, гексоктаэдрический класс симметрии.

Фиг. 2. ЭДС-спектр.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

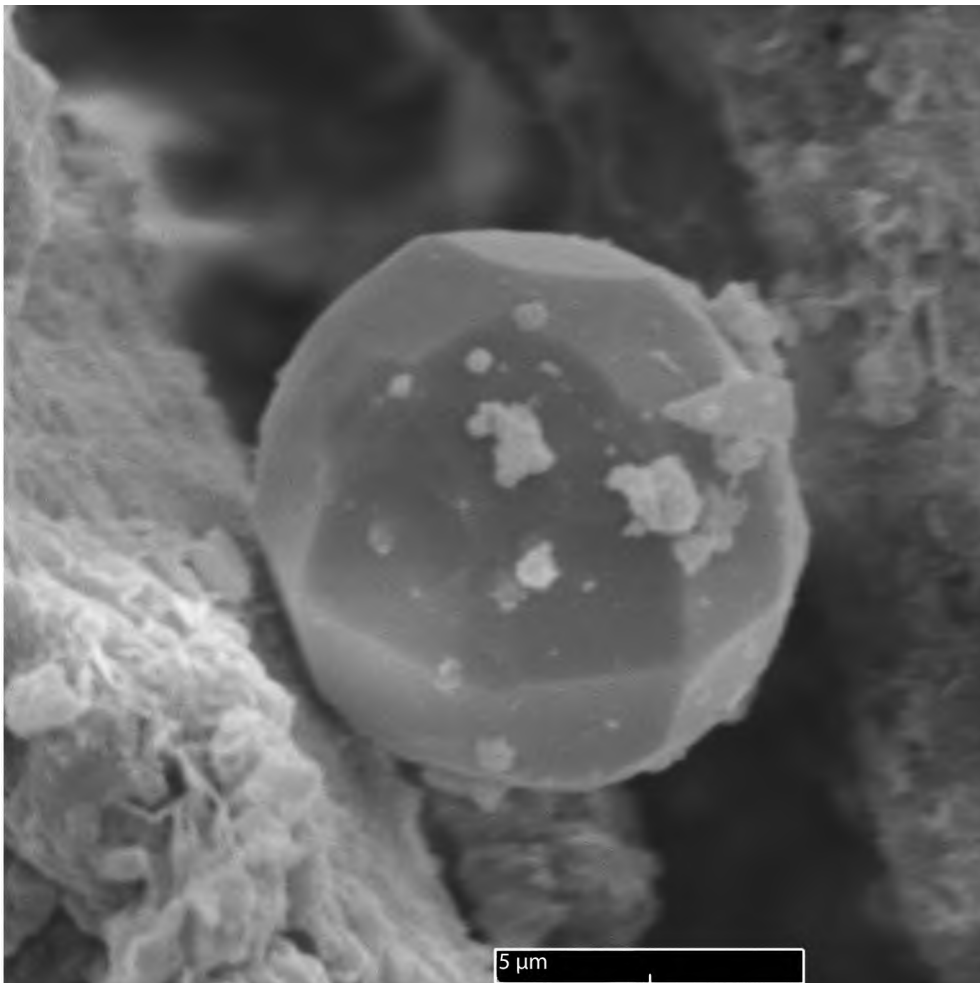
## Plate I

Magnetite crystal, Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/3, Au-Pd coating.

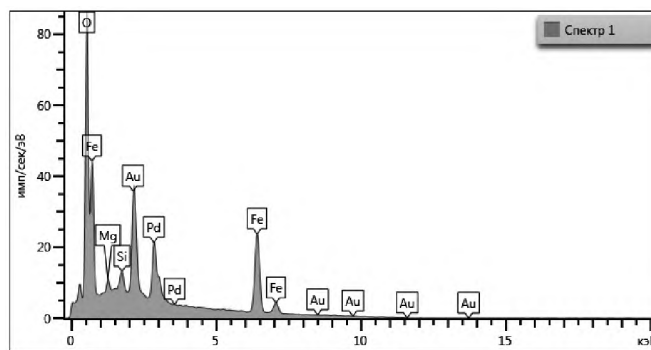
Fig. 1. Magnetite crystal, cubic system, hexaoctahedral symmetry class.

Fig. 2. EDS spectrum.

Fig. 3. Semiquantitative element content.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
O	25.51	0.43
Mg	0.74	0.10
Si	0.83	0.09
Fe	43.62	0.64
Pd	12.04	0.48
Au	17.26	0.50
Сумма/Total:	100.00	

3

## Т а б л и ц а II

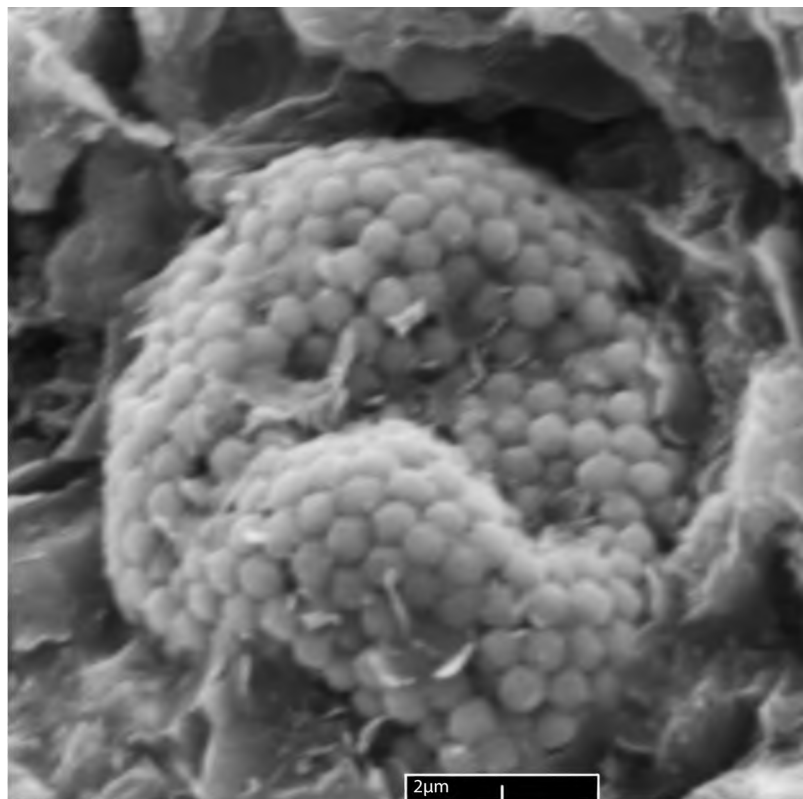
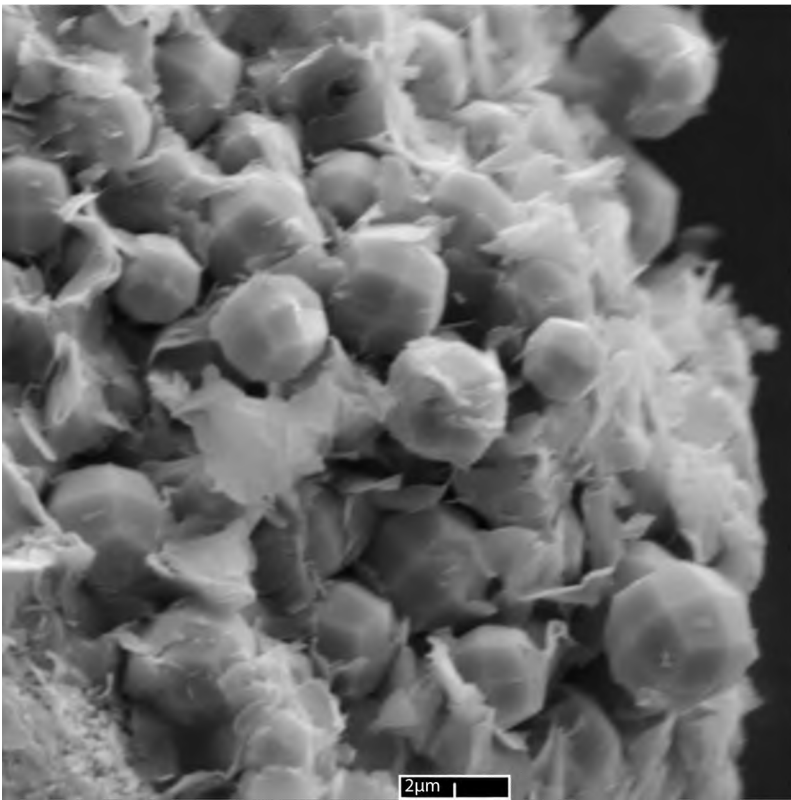
Фиг. 1. Кристаллы магнетита, окруженные фоссилизированной органической пленкой; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/7.

Фиг. 2. Фрамбонд магнетита по спороподобной форме; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

## Plate II

Fig. 1. Magnetite crystals surrounded by a fossilized organic membrane; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/7.

Fig. 2. Framboid of magnetite after spore-like form; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.



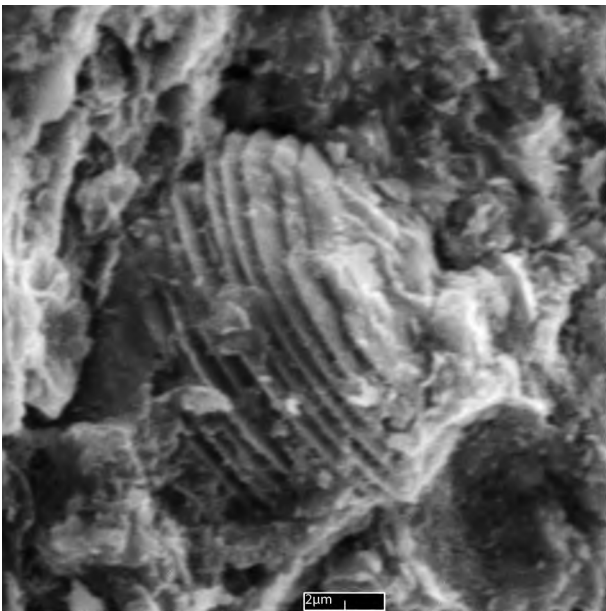
### Таблица III

- Фиг. 1. Пластинки магнетита; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/1  
Фиг. 2. Пластинки магнетита; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.  
Фиг. 3. Игольчатые кристаллы гипса; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.  
Фиг. 4. Таблитчатый кристалл предположительно оливина; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

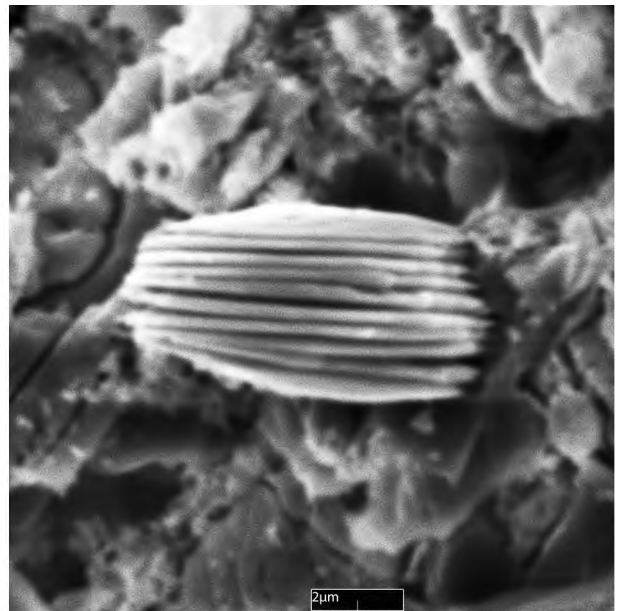
### Plate III

- Fig. 1. Magnetite platelets; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/1.  
Fig. 2. Magnetite platelets, Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.  
Fig. 3. Needle-shaped gypsum crystals; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.  
Fig. 4. Tabular crystal of presumably olivine, Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.

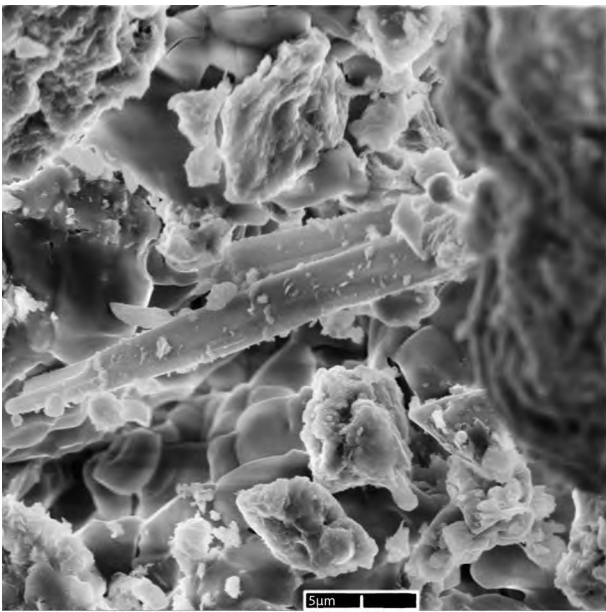




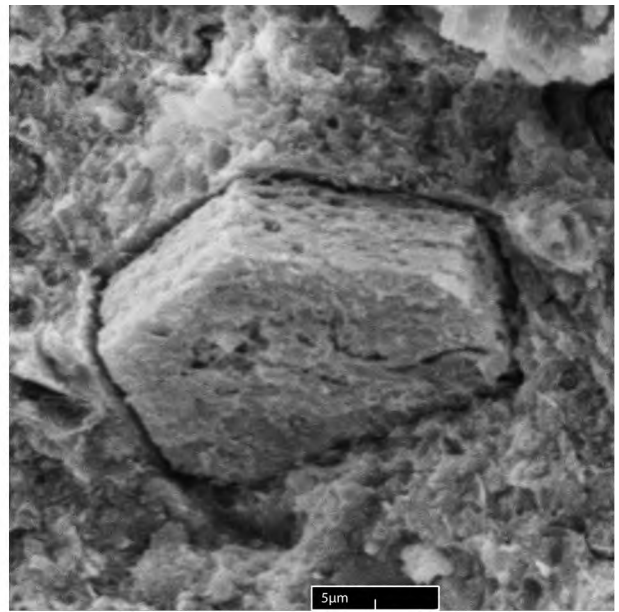
1



2



3



4

#### Таблица IV

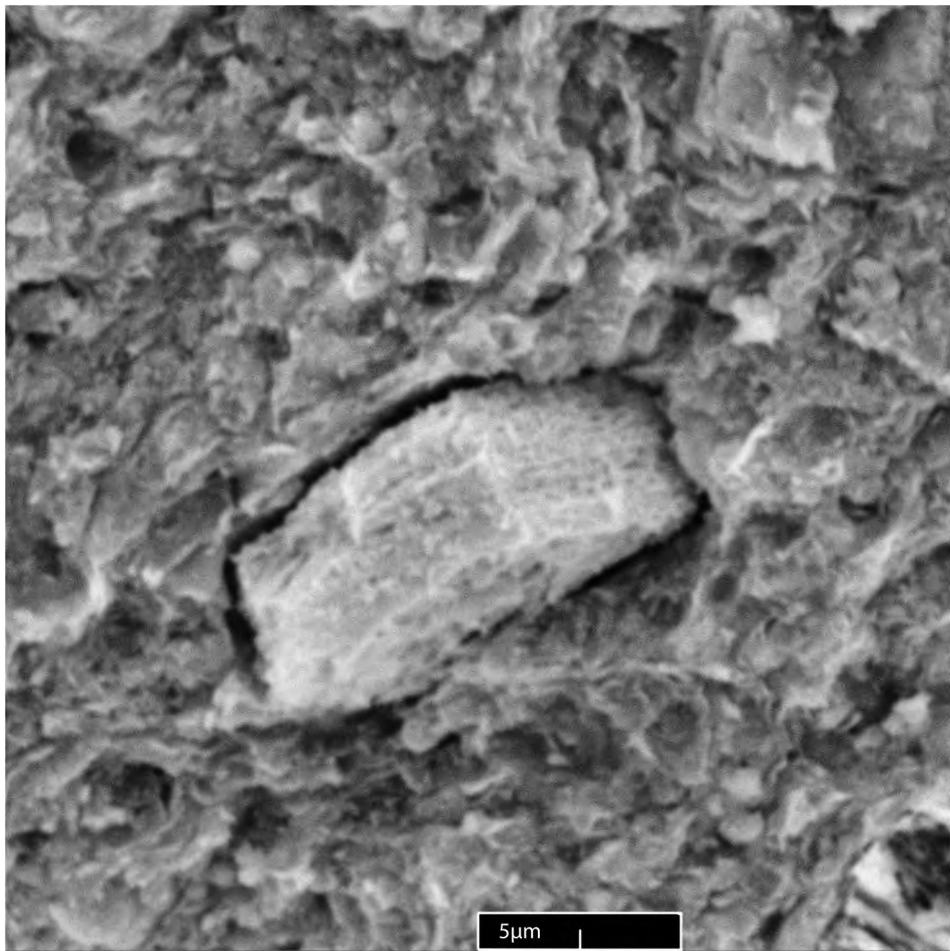
Фиг. 1. Таблитчатый кристалл предположительно оливина; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

Фиг. 2. Таблитчатый кристалл предположительно оливина, его ЭДС-спектр и полуколичественное содержание присутствующих элементов; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр.1/2.

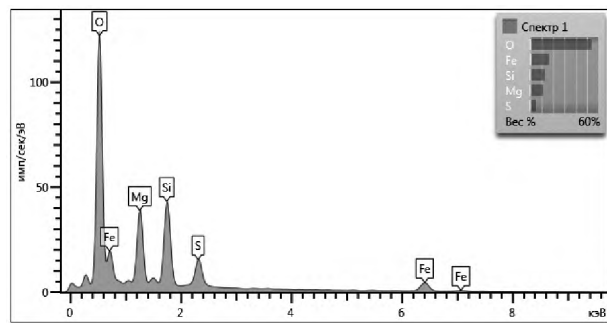
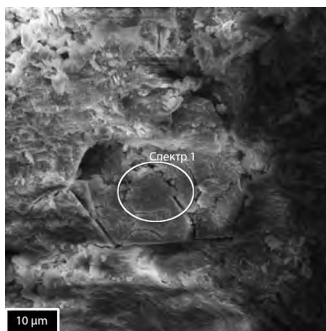
#### Plate IV

Fig. 1. Tabular crystal of presumably olivine; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.

Fig. 2 Tabular crystal of presumably olivine and its EDS spectrum and semiquantitative element content; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
O	53.84	0.42
Mg	11.37	0.18
Si	12.82	0.19
S	5.36	0.16
Fe	16.60	0.51
Сумма/Total:	100.00	

## Т а б л и ц а V

Фрамбоиды пирита, метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2, без напыления.

Фиг. 1. Двумерная карта распределения элементов для области с двумя фрамбоидами пирита.

Фиг. 2. ЭДС-спектр фрамбоида (спектр 12), показывает высокое содержание железа и серы.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов; присутствие кислорода, кремния и алюминия обусловлено преобладанием силикатов в окружающем минеральном матриксе.

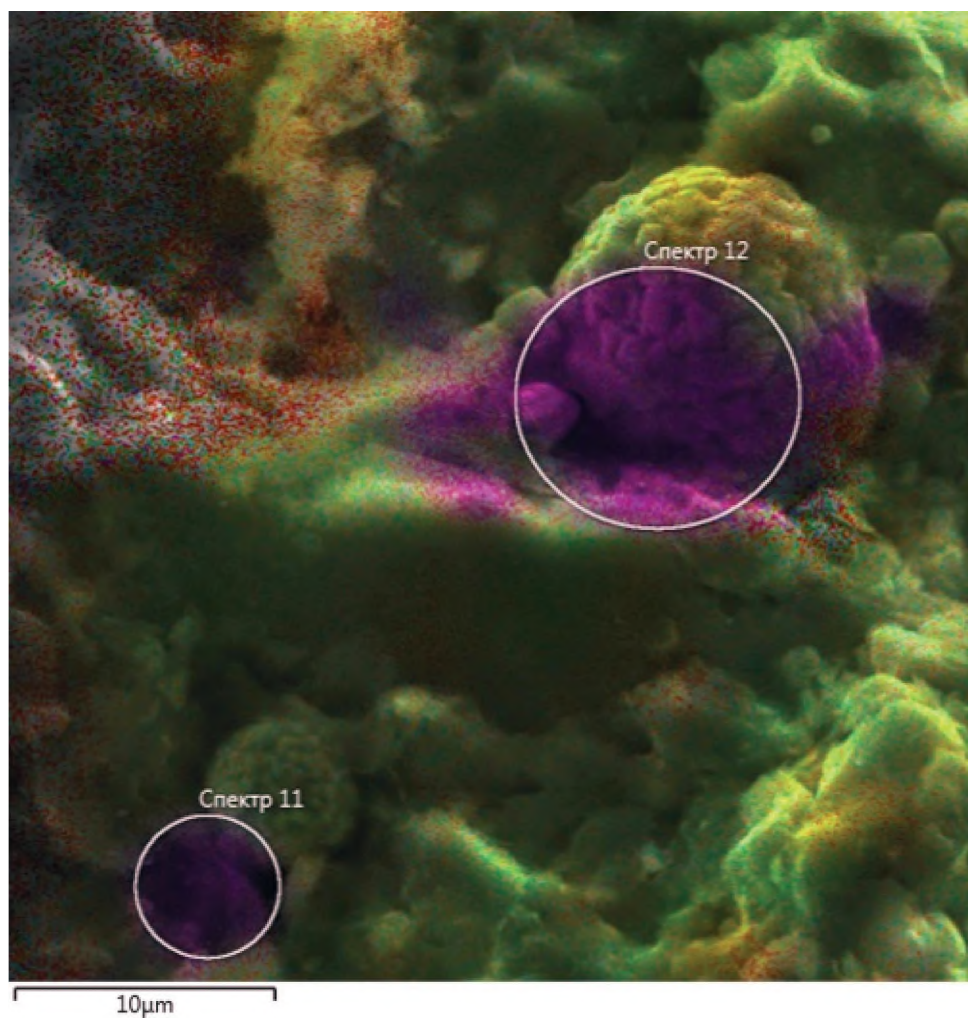
## Plate V

Pyrite framboids, Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2, uncoated

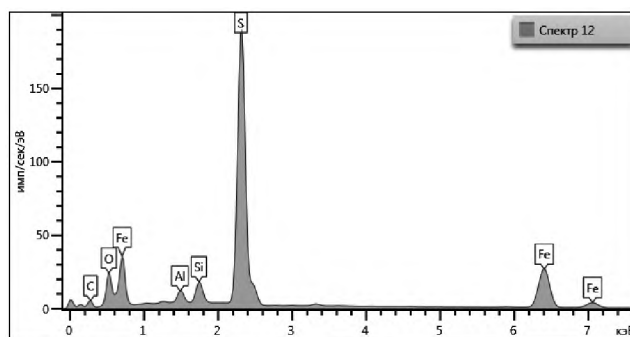
Fig. 1. Two-dimensional EDS x-ray map of the distribution of elements for an area with two pyrite framboids.

Fig. 2. EDS spectrum of framboid (spectrum 12), shows high content of iron and sulfur.

Fig. 3. Semiquantitative element content; the presence of oxygen, silicon and aluminum is due to the predominance of silicates in the surrounding rock matrix.



1



2

Элемент / Element	Вес / Weight, %	σ-вес / σ-weight, %
O	16.73	0.20
Al	1.73	0.05
Si	2.79	0.05
S	44.38	0.18
Fe	34.37	0.19
Сумма / Total:	100.00	

3



## Таблица VI

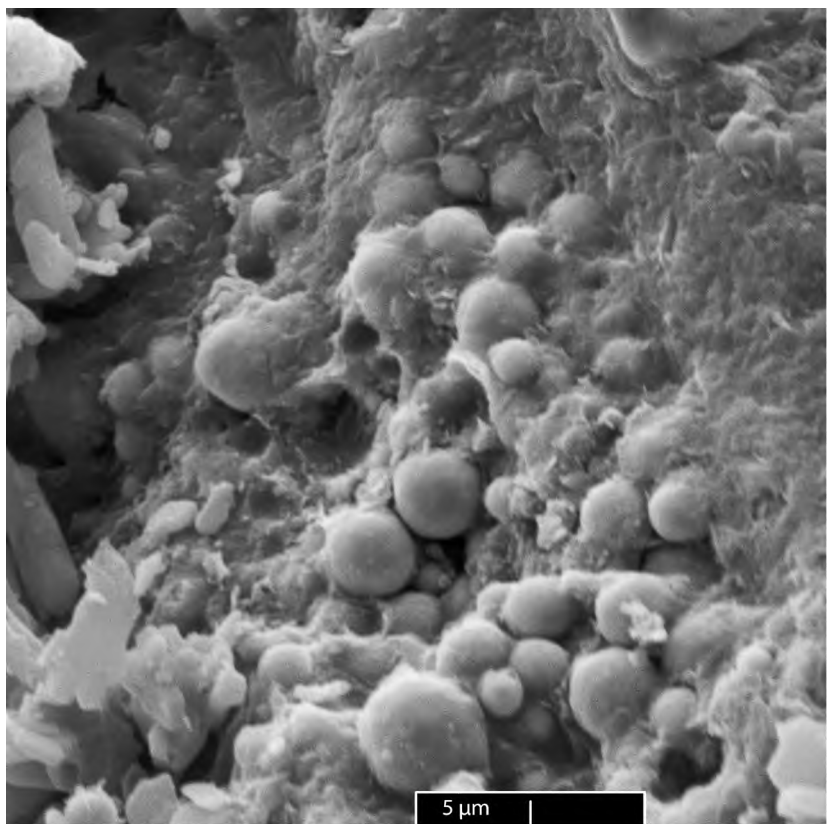
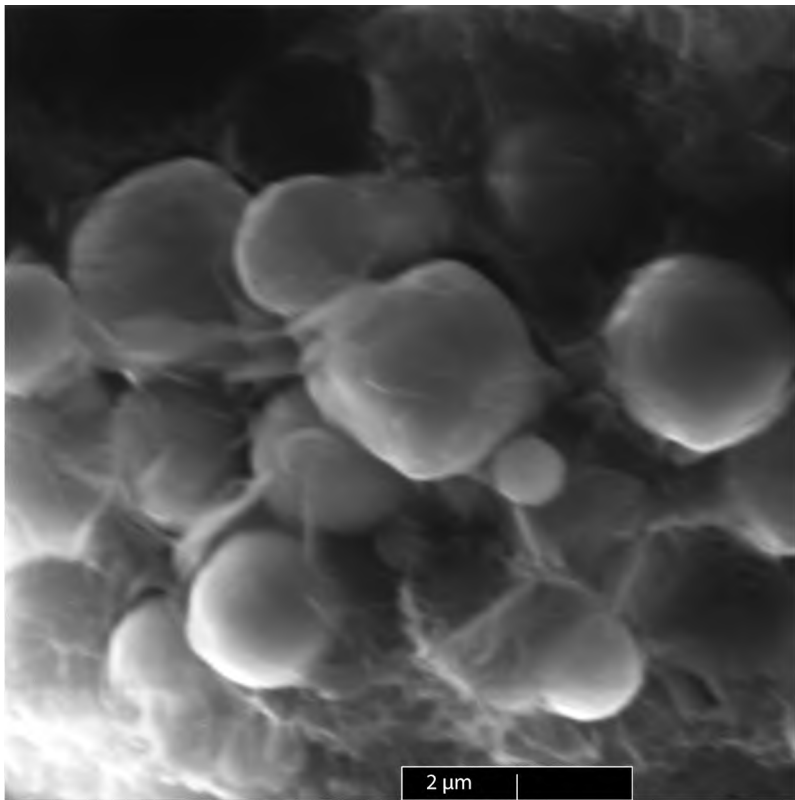
Фиг. 1. Колония кокковидных формы размером от 0,5 до 2 мкм; компактное расположение и значительный диапазон размеров клеток, а также наличие окружающей фоссилизированной органической пленки указывает на то, что клетки фоссилизовались на разных стадиях роста за очень короткий промежуток времени; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

Фиг. 2. Колония кокковидных форм размером от 1 до 2,5 мкм, окруженные фоссилизированной органической пленкой; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/7.

## Plate VI

Fig. 1. Colony of coccoid forms ranging in size from 0.5 to 2 microns; compact arrangement and a significant range of cell sizes, as well as the presence of the surrounding fossilized organic membrane, indicates that cells were fossilized at different stages of growth in a very short period of time; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.

Fig. 2. Colony of coccoid forms ranging in size from 1 to 2.5 microns, surrounded by fossilized organic membrane; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



## Таблица VII

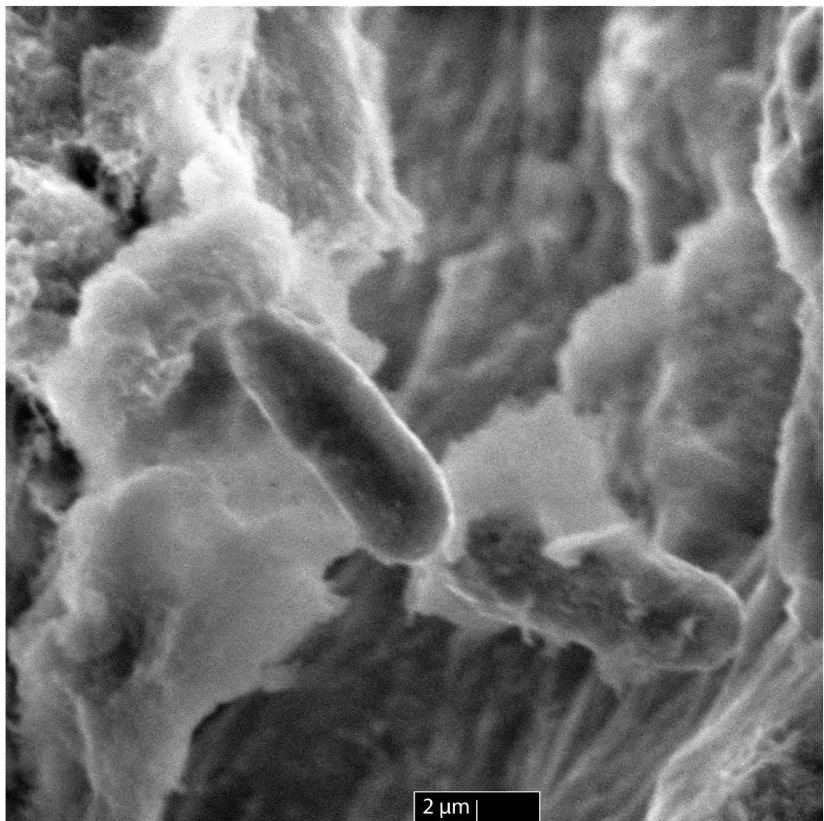
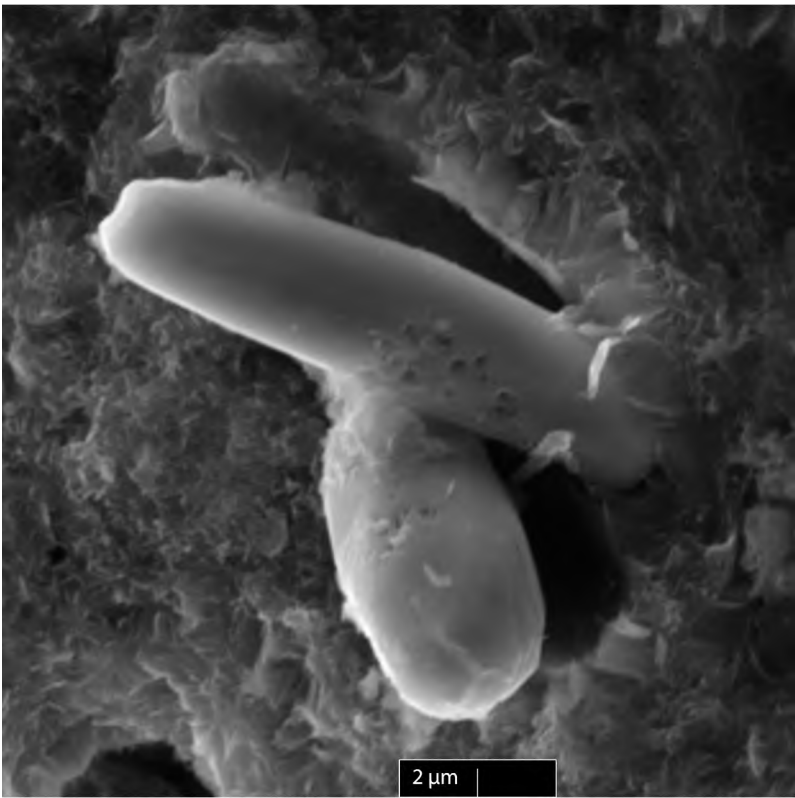
Фиг. 1. Два фоссилизованных палочковидных микроорганизма; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

Фиг. 2. Два фоссилизованных палочковидных микроорганизма; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

## Plate VII

Fig. 1. Two fossilized rod-shaped microorganisms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.

Fig. 2. Two fossilized rod-shaped microorganisms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



## Таблица VIII

Фиг. 1. Нитчатый бактериальный микроорганизм, толщина нити около 2 мкм; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

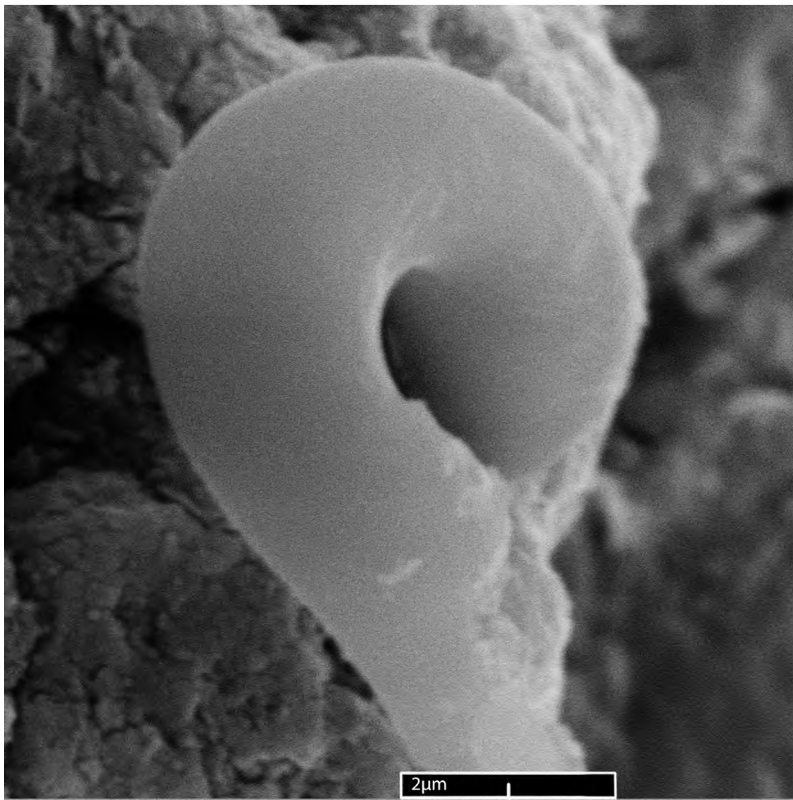
Фиг. 2. Однорядная нить цианобактерии с толстым (9 мкм в ширину) чехлом и трихомом с линейной цепочкой клеток (диаметр 1,8 мкм x 5,5 мкм), с закругленными концами и характерными поперечными сужениями; изображение получено при помощи BSE-детектора СЭМ с полевой эмиссией; метеорит Оргей, RBH, обр. Org\_S2.

## Plate VIII

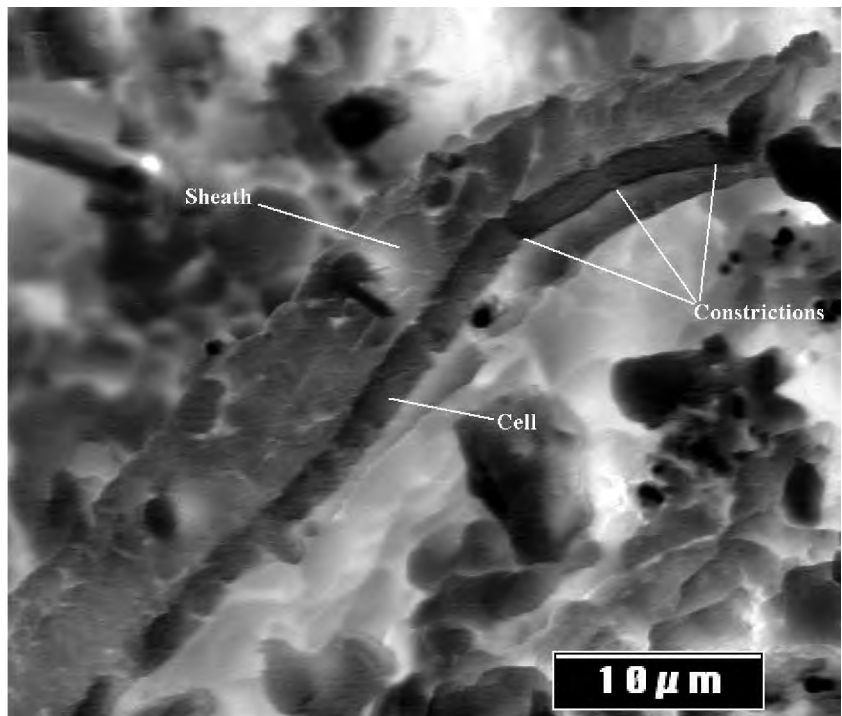
Fig. 1. Filamentous bacterial microorganism, filament thickness about 2  $\mu\text{m}$ ; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.

Fig. 2. Uniseriate cyanobacterial filament with thick (9  $\mu\text{m}$  broad) sheath and trichome with linear chain of cells (1.8  $\mu\text{m}$  dia. x 5.5  $\mu\text{m}$  long) with rounded ends and distinctive cross-wall constrictions; FESEM negative Backscatter Electron (BSED) image; Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_S2.





1



2

## Таблица IX

Фиг. 1. Чехол цианобактериальной нити; метеорит Оргей, RBH, обр. Org\_S2.

Фиг. 2. Спиральная цианобактериальная нить с апикальной гетероцистой; RBH, обр. Org\_S2.

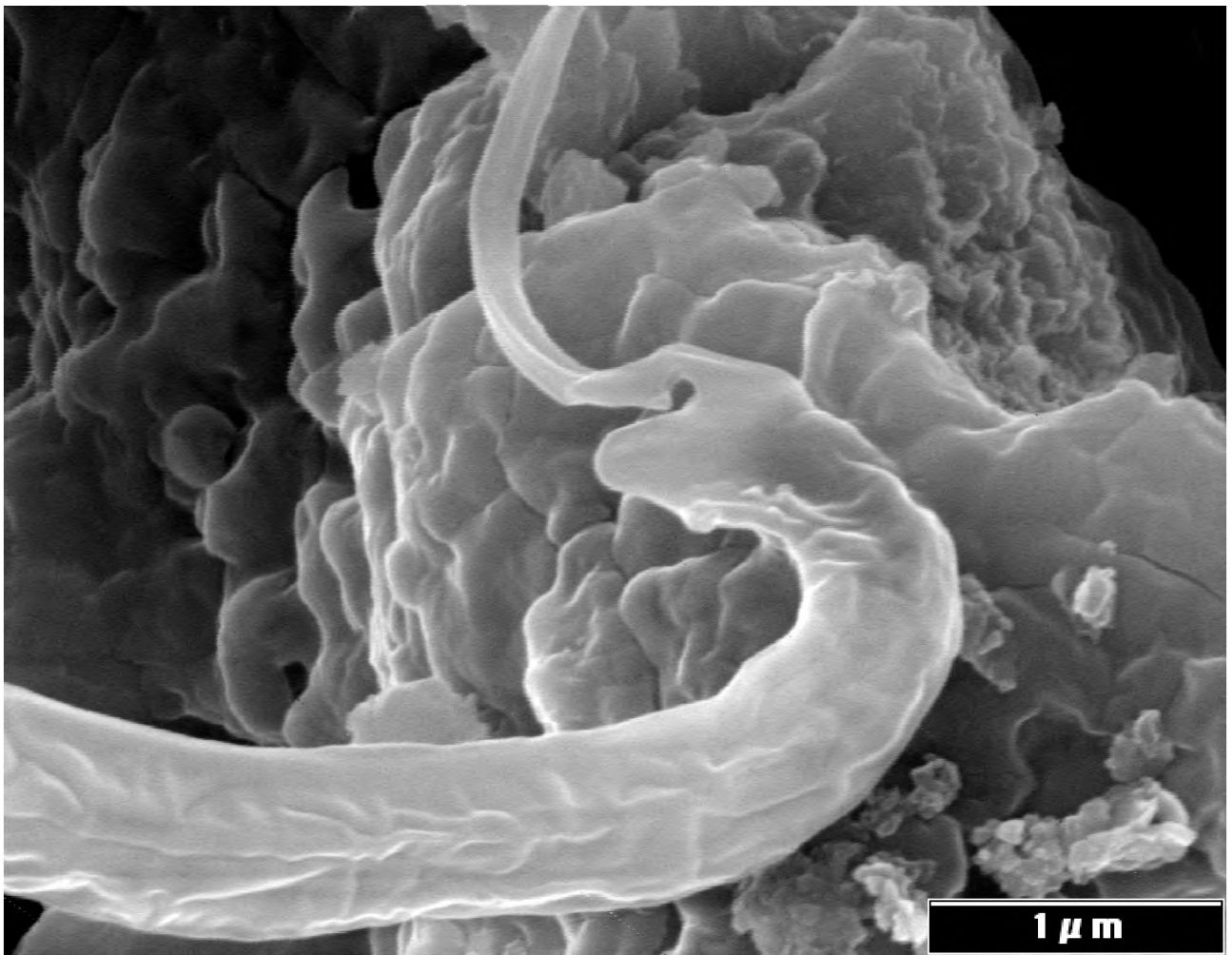
Фиг. 3. Разветвленная цианобактериальная нить с апикальной гетероцистой или акинетой, RBH, обр. Org\_A.

## Plate IX

Fig. 1. Sheath of uniseriate cyanobacterial filament; Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_S2.

Fig. 2. Spiral cyanobacterial filament with apical heterocyst; Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_S2.

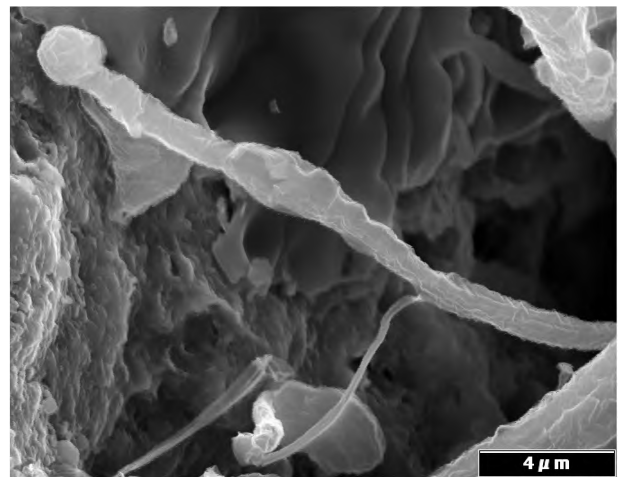
Fig. 3. Branched cyanobacterial filament with apical akinete or heterocyst, specimen Org\_A.



1



2



3

## Таблица X

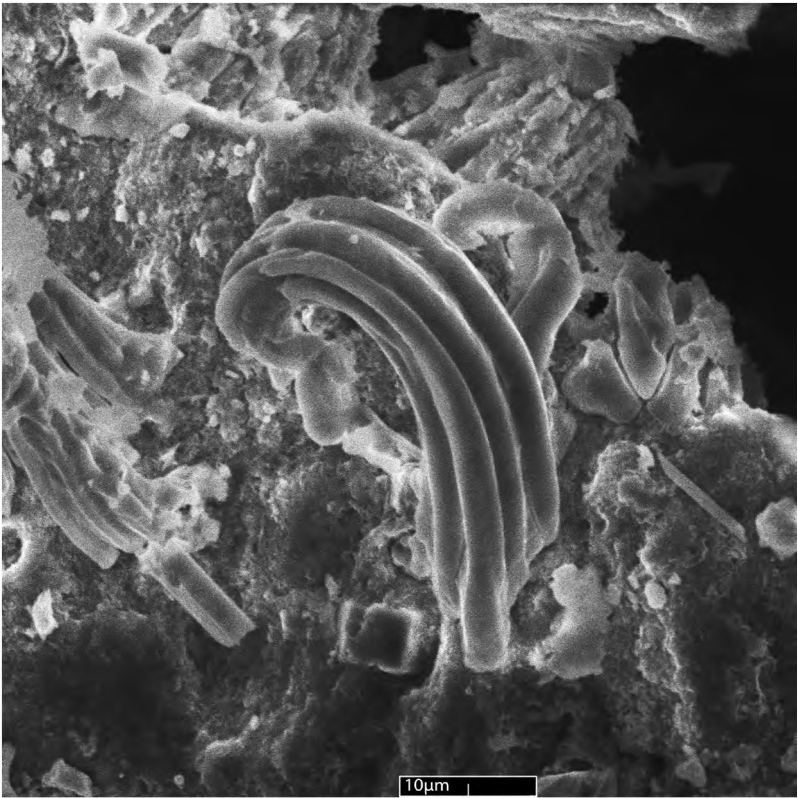
Фиг. 1. Пучок изогнутых трихомов; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

Фиг. 2. Пучок изогнутых трихомов; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

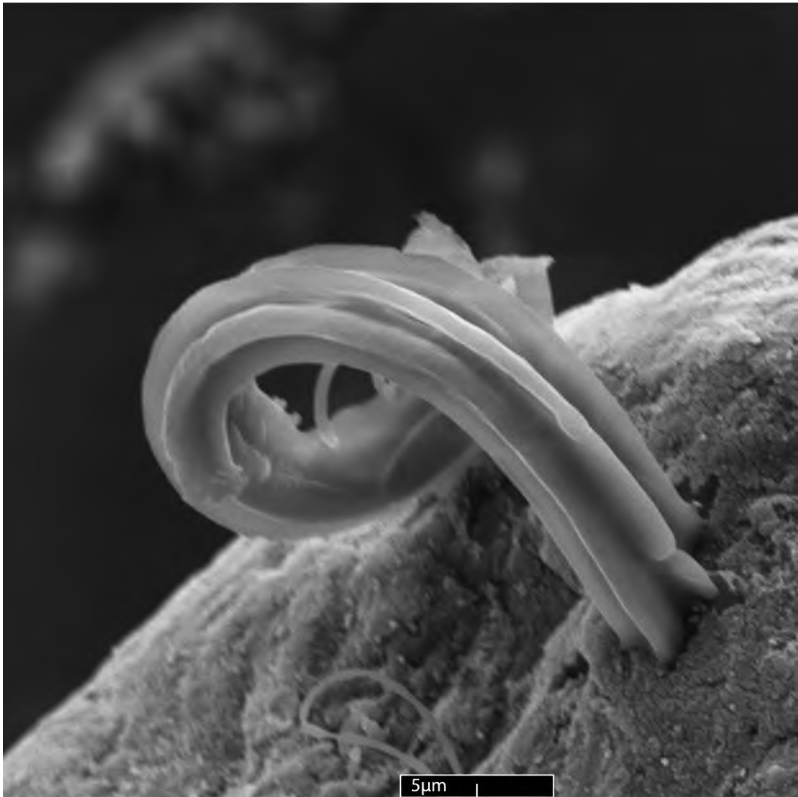
## Plate X

Fig. 1. Bundle of curved trichomes; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.

Fig. 2. Bundle of curved trichomes; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



1



2



## Таблица XI

Фиг. 1-3. Нитчатые цианобактерии с множественными трихомами в общем чехле; SE- (фиг. 1 и 2) и BSE-изображение (фиг. 3); метеорит Оргей; RBH, обр. Org\_A.

Фиг. 4. Увеличенное изображение центральной области фиг. 1 с 3 обособившимися короткими трихомами (A = 1,3 мкм × 5,9 мкм; B = 1,3 мкм × 4,0 мкм; C = 1,1 мкм × 4,5 мкм); метеорит Оргей; РБХ, образец Org\_A.

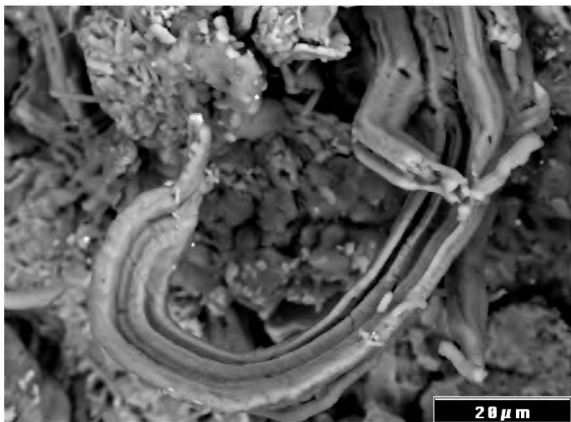
Фиг. 5. Точечный ЭДС-спектр выходящего трихома демонстрирует высокое содержание магния, кислорода и серы (заполнение эпсомитом). Атомное отношение C:S = 0,18 (Атомное отношение C:S живой клетки ~ 32); метеорит Оргей; RBH, обр. Org\_A.

## Plate XI

Fig. 1-3. Filamentous cyanobacteria with multiple trichomes in a common sheath; SE- (figs. 1 and 2) and BSE-images (fig. 3).

Fig. 4. Enlargement of central region of fig. 1 with 3 escaped short trichomes (A=1.3  $\mu\text{m}$  × 5.9  $\mu\text{m}$ ; B=1.3  $\mu\text{m}$  × 4.0  $\mu\text{m}$ ; C=1.1  $\mu\text{m}$  × 4.5  $\mu\text{m}$ ); Orgueil meteorite; RBH, specimen Org\_A.

Fig. 5. EDS spectrum at of emergent trichome shows high content of magnesium, sulfur oxygen (infilled with epsomite). Atomic C:S = 0.18 (Living cell Atomic C:S ~ 32); Orgueil meteorite; RBH, specimen Org\_A.



1



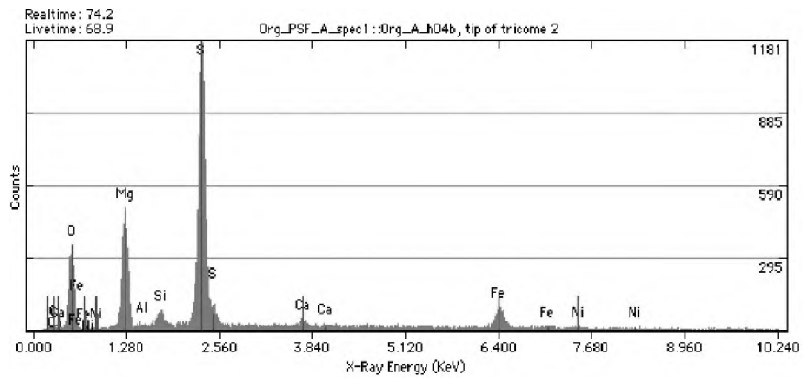
2



3



4



5

Quantitative Results for Org\_A\_h04b, tip of trichome 2  
Analysis: Bulk Method : Standardless  
Acquired 13-Jul-2004, 15.0 KeV @10 eV/channel

Element	Weights Std.	Dev.	MDL	Atomic %	k-Ratio	Intensities
C	2.65	0.99	0.85	5.44	0.0139	96.3
O	27.42	1.48	0.71	42.28	0.1223	2178.2
Mg	13.64	0.90	1.05	13.84	0.0828	2676.0
Al ?	0.04	0.03	16.89	0.04	0.0003	8.4
Si ?	1.68	0.59	2.28	1.48	0.0126	398.7
S	38.57	1.22	0.47	29.68	0.3364	9485.6
Ca ?	1.20	0.46	2.84	0.74	0.0106	204.3
Fe	12.95	1.07	1.64	5.72	0.1133	800.9
Ni ?	1.85	0.77	6.05	0.78	0.0162	67.2

Total 100.00  
? These elements are statistically insignificant.

## Таблица XII

Цианобактериальный чехол с пучком нитей, метеорит Оргей, RBH, образец Org\_E.

Фиг. 1. Расслоенный чехол с нитями (шириной 8 мкм, сужающейся до 3 мкм на вершине), присутствует апикальный волосок и узелки.

Фиг. 2. Точечный ЭДС-спектр внутренней части нити в X2 и количественное содержание присутствующих элементов.

Фиг. 3. Точечный ЭДС-спектр узелка в X3 и количественное содержание присутствующих элементов, демонстрирующие замещение чехла цианобактериальной нити сульфатом магния.

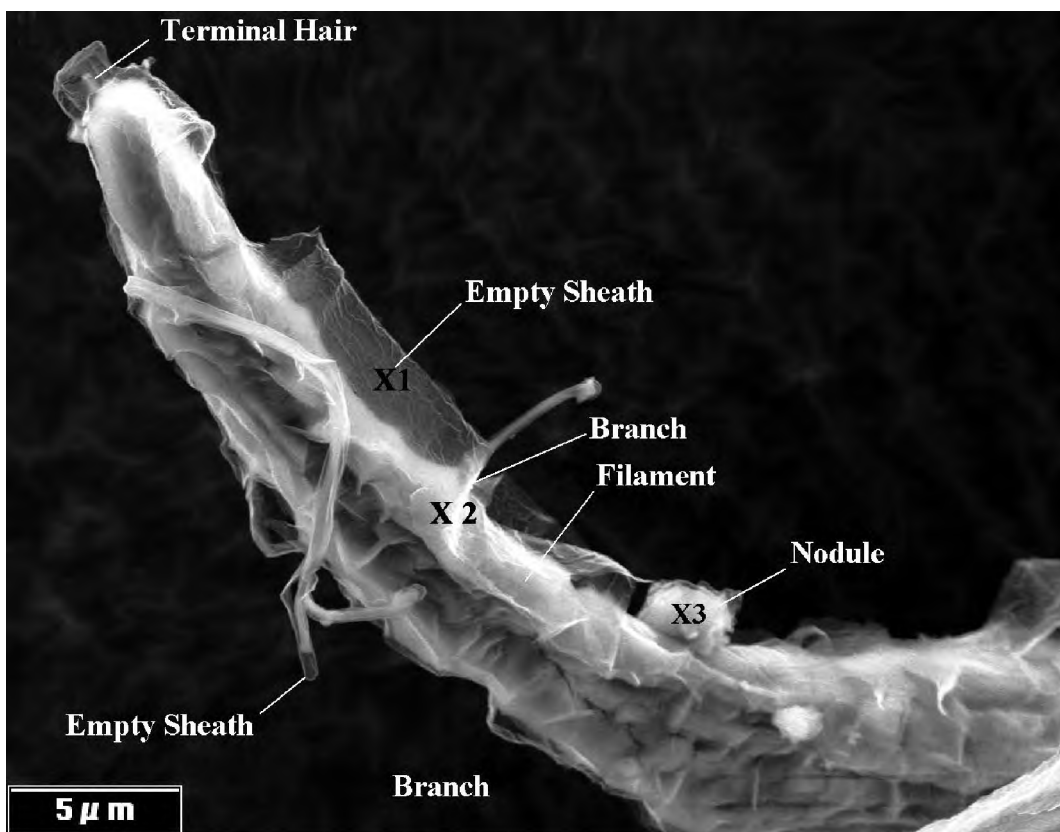
## Plate XII

Cyanobacterial sheath with bundle of filaments; Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_E.

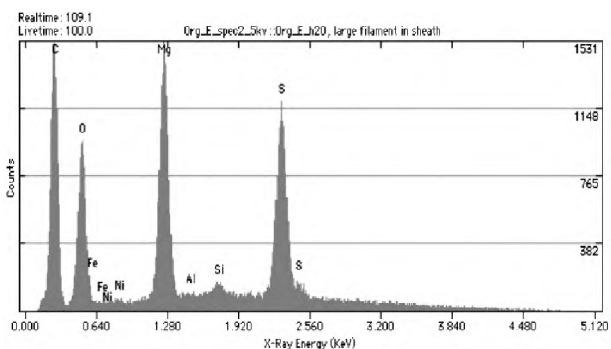
Fig. 1. Delaminated cyanobacterial sheath with filaments (8  $\mu\text{m}$  broad tapering to 3  $\mu\text{m}$  at apex), terminal hair and nodules.

Fig. 2. EDS spot spectrum of filament interior at X2 and quantitative element content.

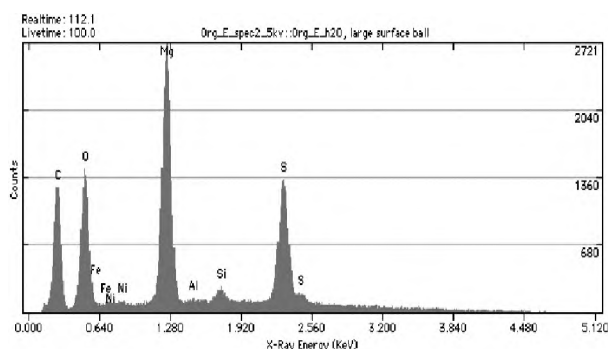
Fig. 3. EDS spot spectrum of nodule at X3 and quantitative element content showing magnesium sulfate permineralization of cyanobacterial filament sheath.



1



2



Quantitative Results for Spectrum2  
 Analysis : Bulk Method : Standardless  
 Acquired 25-Aug-2004, 5.0 KeV @10 eV/channel

Element	Weight (%)	Std. Dev.	MDL	Atomic %	k-Ratio	Intensities
C	37.12	1.26	0.24	55.83	0.1356	8174.7
O	10.45	0.65	0.30	11.50	0.0729	5810.7
Mg	15.61	0.55	0.52	11.60	0.1450	9368.6
Al ?	0.00	0.00	1.60	0.00	0.0000	0.2
Si ?	1.13	0.41	2.1 S	0.73	0.0106	487.6
S	35.45	1.24	0.5 S	19.97	0.3265	9009.9
Fe ?	0.00	0.00	2.09	0.00	0.0000	0.2
Ni ?	0.23	0.10	5.80	0.07	0.0015	114.7
Total 100.00						
? These elements are statistically insignificant.						

Quantitative Results for Org\_E\_h20, large surface ball  
 Analysis : Bulk Method : Standardless  
 Acquired 25-Aug-2004, 5.0 KeV @10 eV/channel

Element	Weight %	Std. Dev.	MDL	Atomic %	k-Ratio	Intensities
C	26.75	1.21	0.26	43.40	0.0962	6776.3
O	12.23	0.72	0.26	14.95	0.0399	3374.3
Mg	24.10	1.05	0.40	19.32	0.2260	17072.5
Al ?	0.00	0.00	1.49	0.00	0.0000	0.2
Si ?	1.63	0.56	1.75	1.17	0.0156	343.0
S	34.36	1.22	0.57	20.33	0.3133	10265.3
Fe ?	0.40	0.16	4.33	0.14	0.0024	201.6
Ni ?	0.43	0.17	4.10	0.14	0.0029	250.1
Total 100.00						
? These elements are statistically insignificant.						

3

### Таблица XIII

Фиг. 1. Увеличенное изображение отслаивающегося пустого чехла нити на табл. XII, фиг. 1; метеорит Оргей, RBH, образец Org\_E.

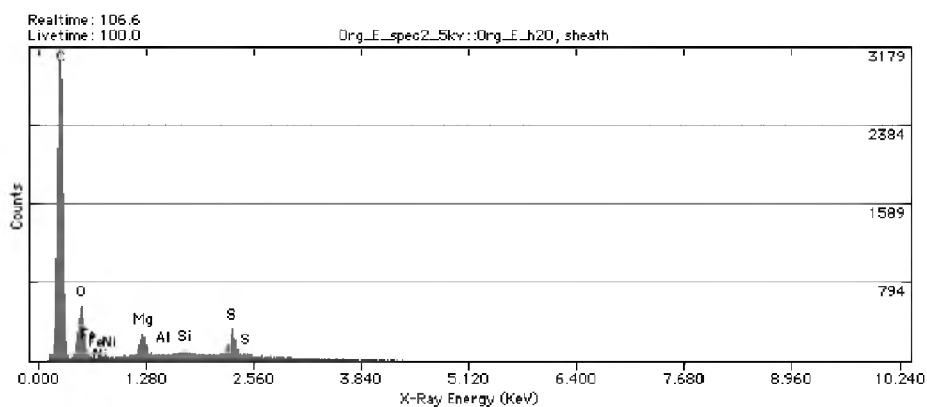
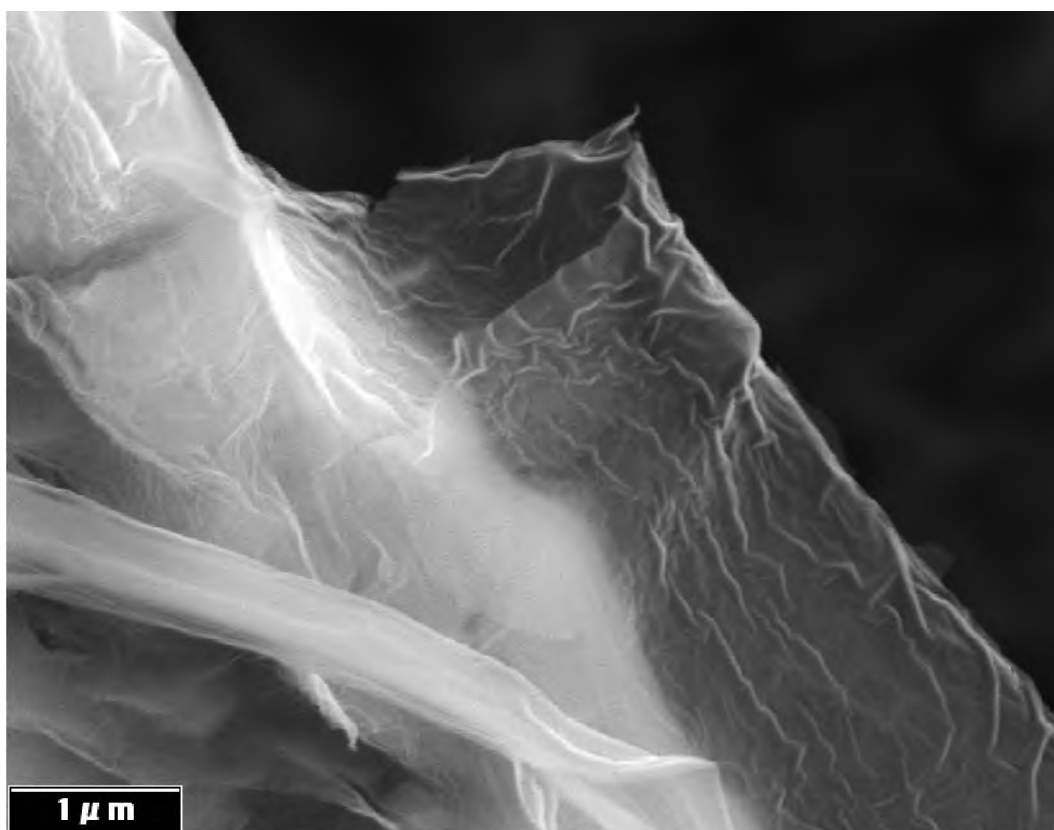
Фиг. 2. ЭДС-спектр чехла в точке X1 демонстрирует высокое содержание углерода (атомный процент 81.88%), а также атомное отношение O/C равное 0,11, что соответствует битуминозному углю; метеорит Оргей, RBH, образец Org\_E.

### Plate XIII

Fig. 1. Enlargement of delaminated empty sheath of the filament (pl. XII, fig. 1); Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_E.

Fig. 2. EDS spectrum at spot X1 of sheath shows high Carbon content (81.88% atomic) and O/C ratio of 0.11 (atomic) consistent with bituminous coal; Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_E.





Quantitative Results for Org\_E\_h20, sheath  
 Analysis: Bulk Method: Standardless  
 Acquired 25-Aug-2004, 5.0 KeV @10 eV/channel

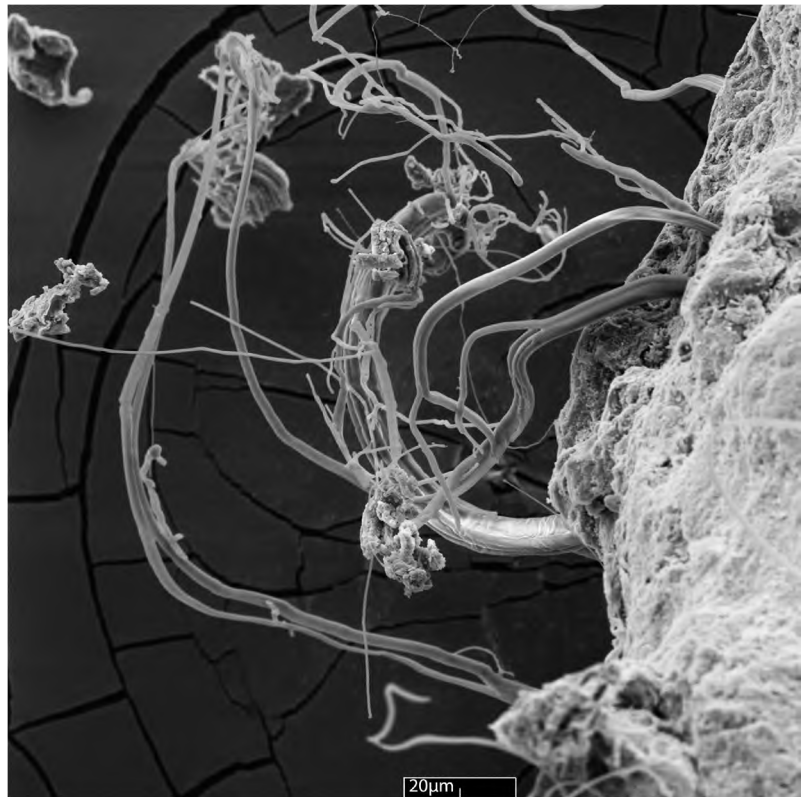
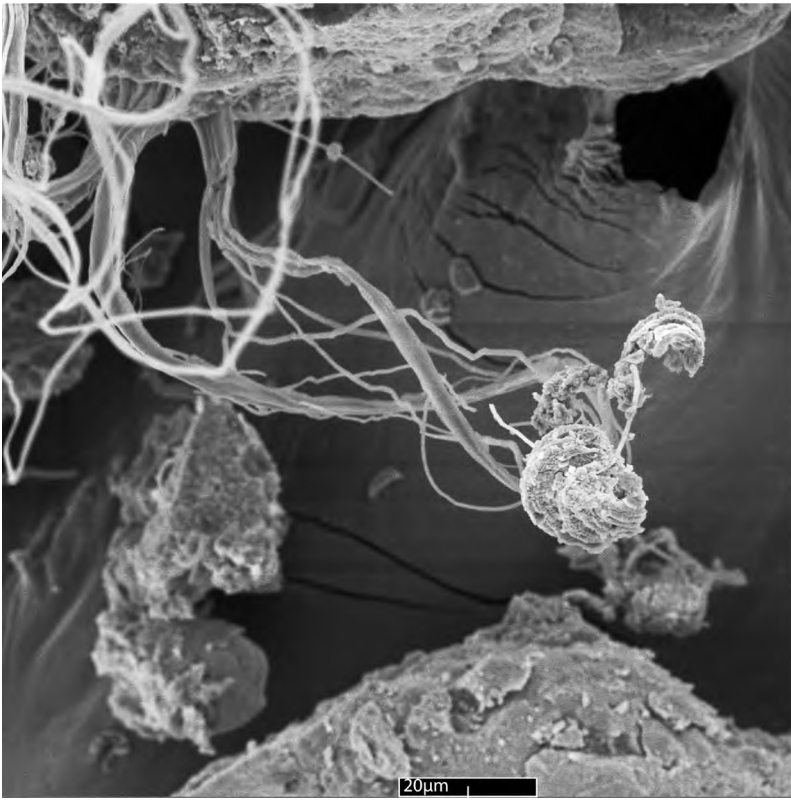
Element	Weight %	Std. Dev.	MDL	Atomic %	k-Ratio	Intensities
C	70.63	1.85	0.16	81.88	0.4235	17044.3
O	10.58	0.71	0.48	8.23	0.0680	3284.4
Mg	3.87	1.02	1.56	2.28	0.0353	1368.7
Al?	0.00	0.00	2.10	0.00	0.0000	0.2
Si?	1.16	0.44	3.28	0.58	0.0105	280.2
S	13.65	0.84	1.38	5.84	0.1211	2003.8
Fe?	0.00	0.00	2.83	0.00	0.0000	0.2
Ni?	0.00	0.00	2.43	0.00	0.0000	0.2
Total 100.00						
? These elements are statistically insignificant.						

**Т а б л и ц а X I V**

Фиг. 1, 2. Нитевидные бактериальные микроорганизмы; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

**P l a t e X I V**

Figs. 1, 2. Filamentous bacterial microorganisms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



## Таблица XV

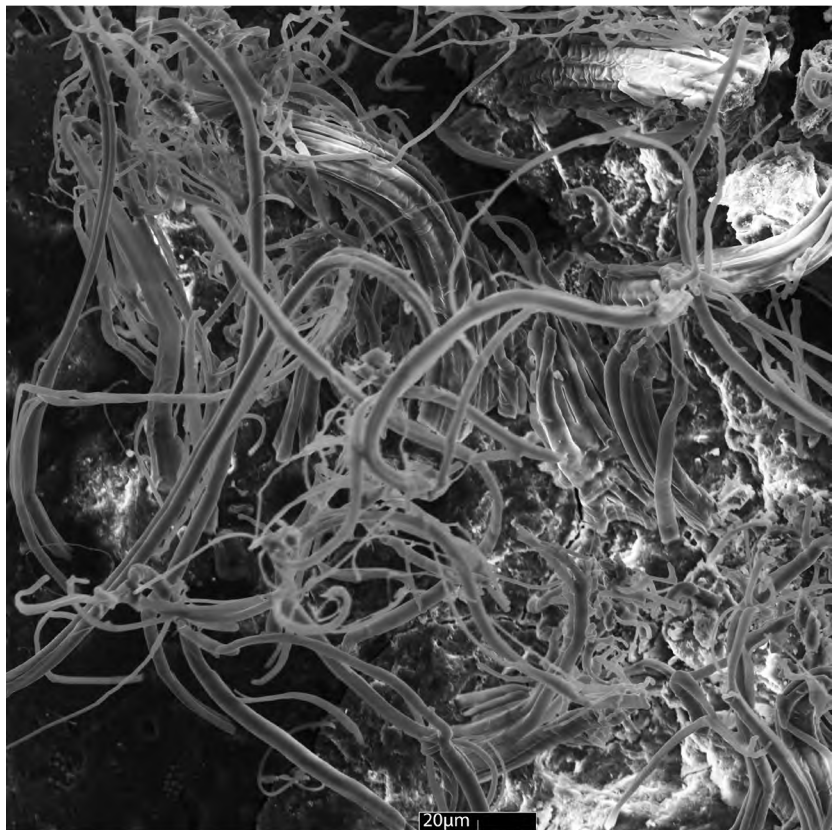
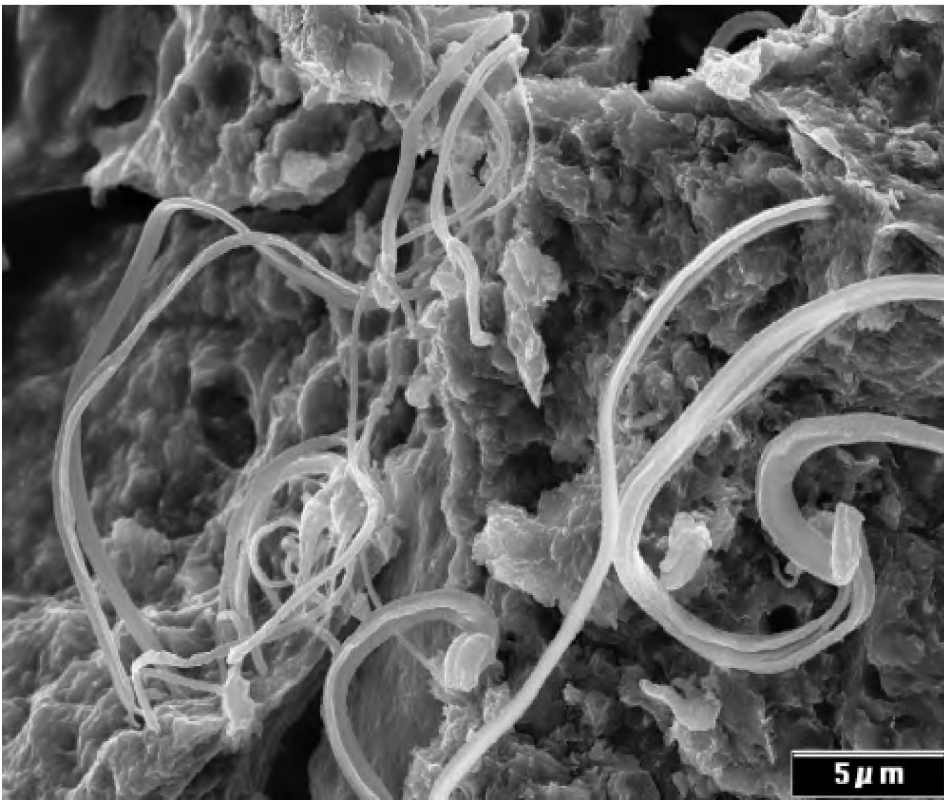
Фиг. 1. Нитевидные бактериальные микроорганизмы; метеорит Оргей, RBH, обр. Org\_S2.

Фиг. 2. Нитевидные бактериальные микроорганизмы; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

## Plate XV

Fig. 1. Filamentous bacterial microorganisms; Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_S2.

Fig. 2. Filamentous bacterial microorganisms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



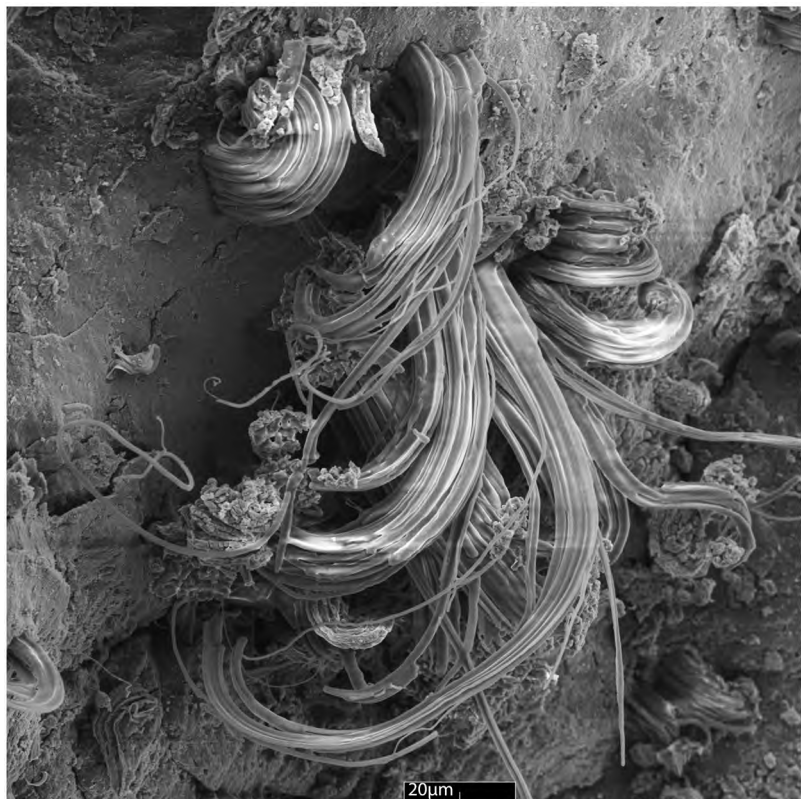
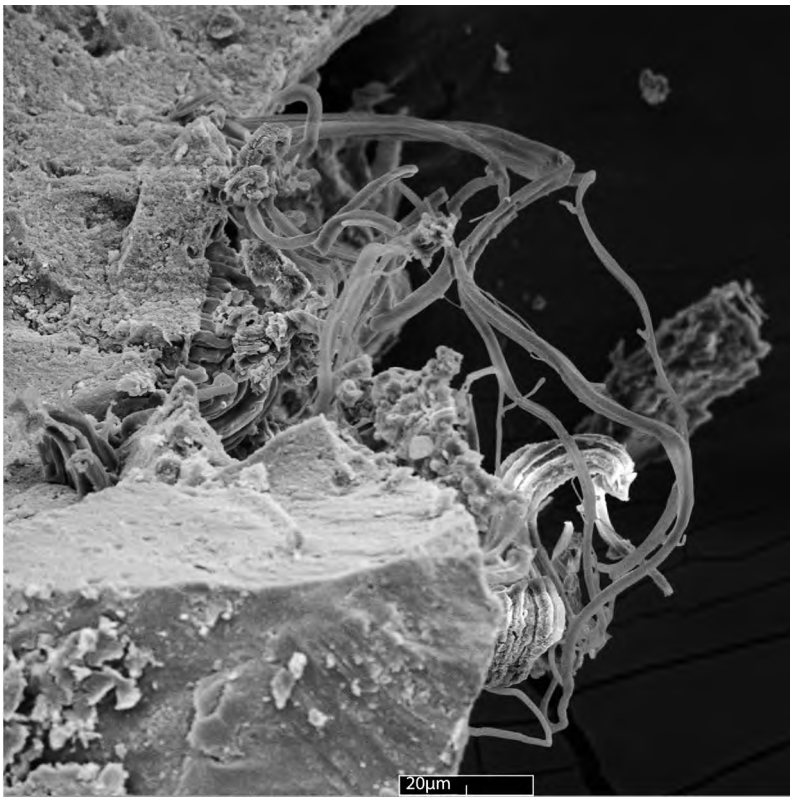


**Т а б л и ц а X V I**

Фиг. 1, 2. Нитевидные бактериальные микроорганизмы; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

**Plate X V I**

Figs. 1, 2. Filamentous bacterial microorganisms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



## Т а б л и ц а X V I I

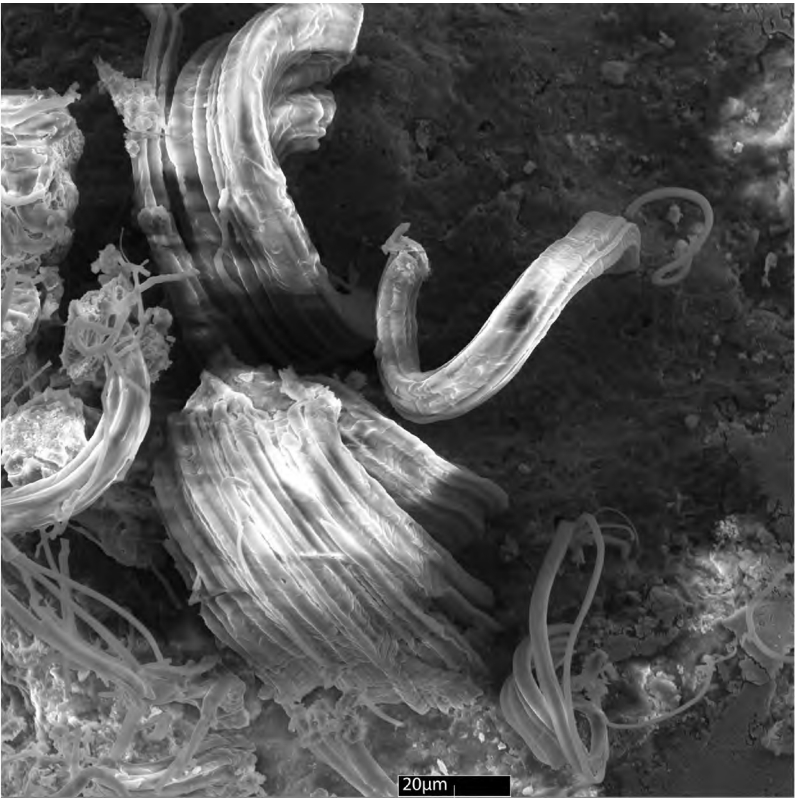
Фиг. 1. Нитевидные бактериальные микроорганизмы; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

Фиг. 2. Чрезвычайно тонкая нить с мелкими, регулярно расположенными утолщениями эллипсоидальной формы, морфологически сходная с актиномицетами, окруженная чехлами цианобактерий; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

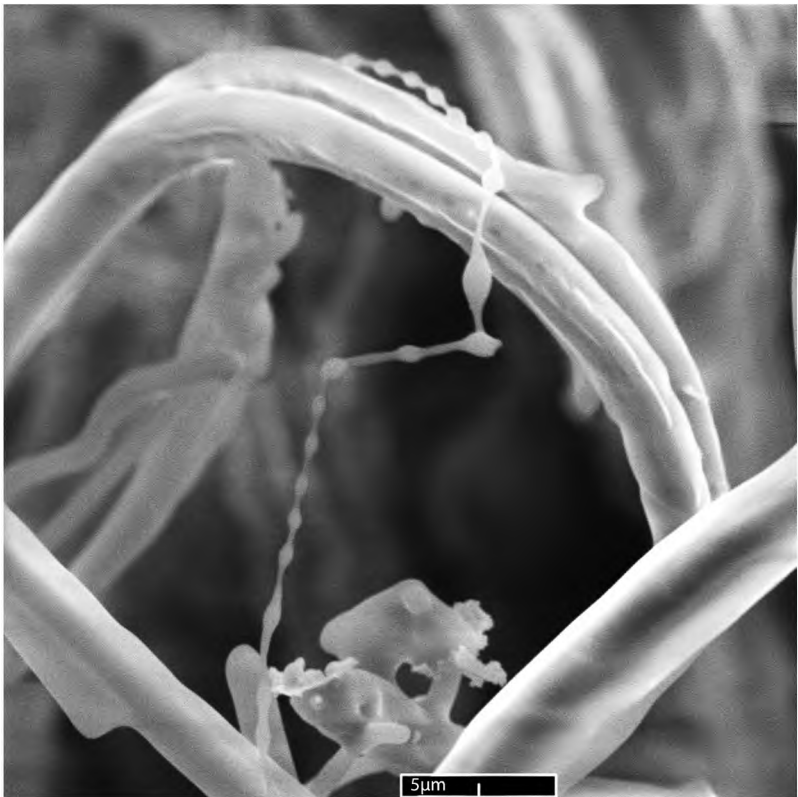
## Pl a t e X V I I

Fig. 1. Filamentous bacterial microorganisms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.

Fig. 2. Extremely fine filament with regular nodes of tiny ellipsoidal shape, morphologically resembling actinomycetes, surrounded by cyanobacterial sheaths; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



1



2

## Таблица XVIII

Фиг. 1. Спиральный бактериальный микроорганизм с несоприкасающимися оборотами; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

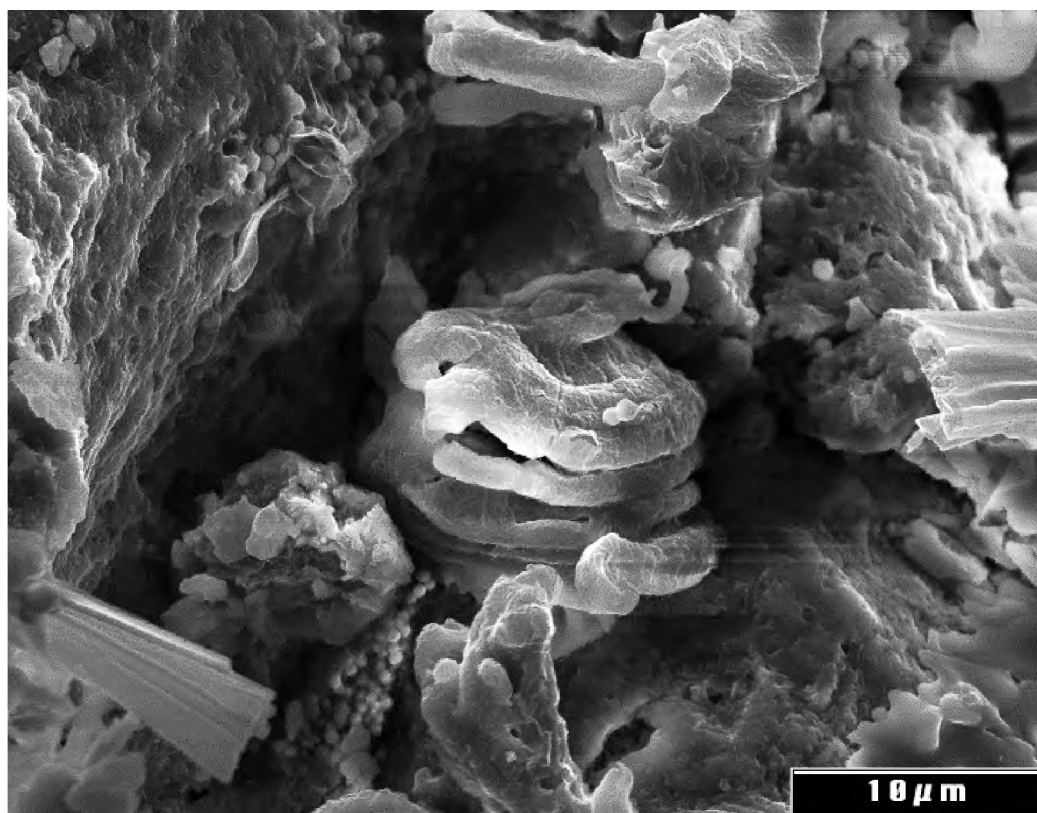
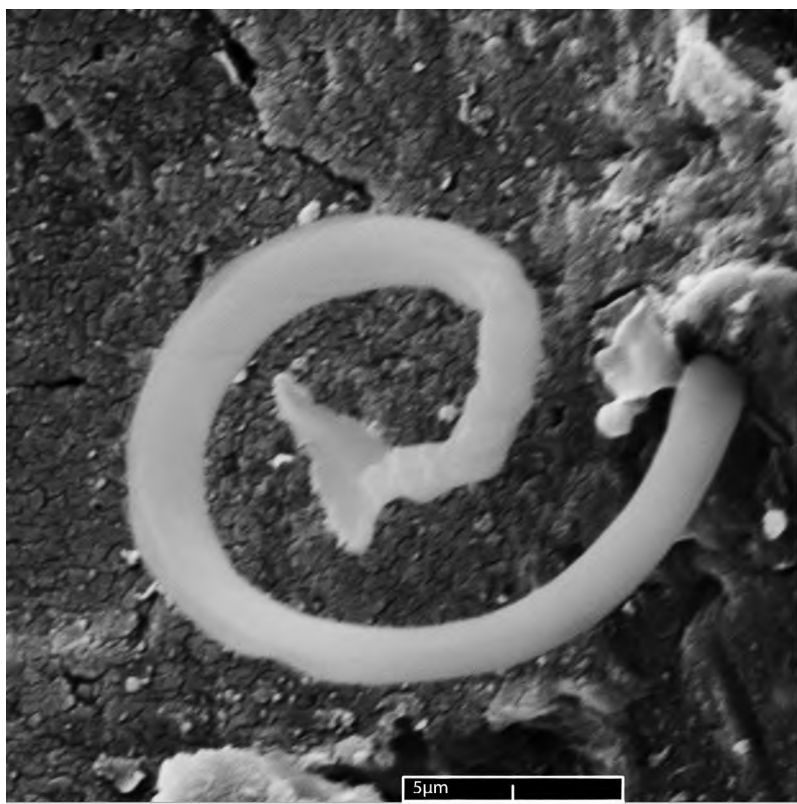
Фиг. 2. Спиральный микроорганизм, сходный с вымершим родом *Obruchevella*; метеорит Оргей, RBH, обр. Org\_A\_h38.

## Plate XVIII

Fig. 1. Spiral bacterial microorganism with non-contiguous turns; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.

Fig. 2. Helical coiled microorganism similar to the extinct genus *Obruchevella*; Orgueil meteorite, RBH, specimen Org\_A\_h38.





## Таблица XIX

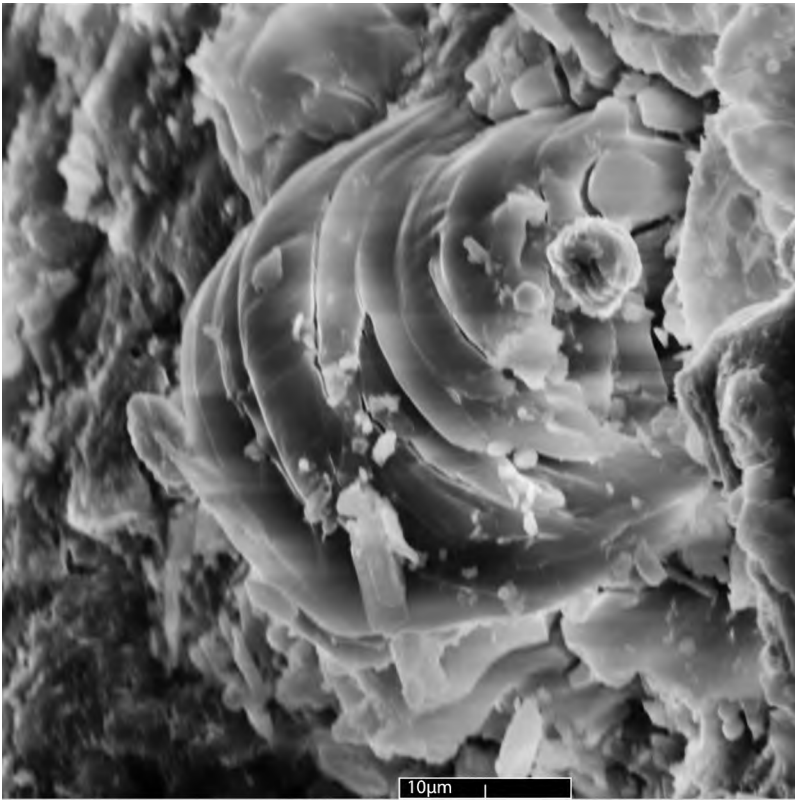
Фиг. 1. Спиральный бактериальный микроорганизм, сходный с вымершим родом *Obruchevella*; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

Фиг. 2. Спиральный бактериальный микроорганизм, сходный с вымершим родом *Obruchevella*; с двумя короткими нитями, вершины которых имеют сферические спорангие- или гетероцистоподобные образования; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

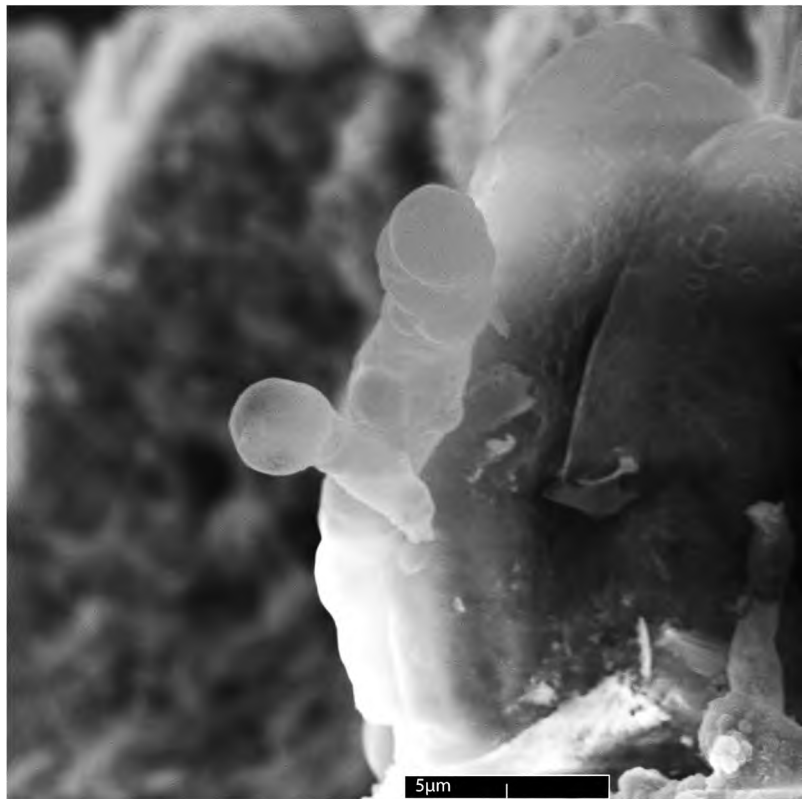
## Plate XIX

Fig. 1. Helical coiled microorganism similar to the extinct genus *Obruchevella*; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.

Fig. 2. Helical coiled microorganism similar to the extinct genus *Obruchevella*; with two short filaments the apices of which have spherical sporangia- or heterocyst-like forms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.



1



2

## Т а б л и ц а X X

Шарообразные формы с порами, предположительно прازیнофиты; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/3.

Фиг. 1. Две клетки сферической формы с порами, DA – поврежденный участок стенки.

Фиг. 2. ЭДС-спектр большей клетки.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

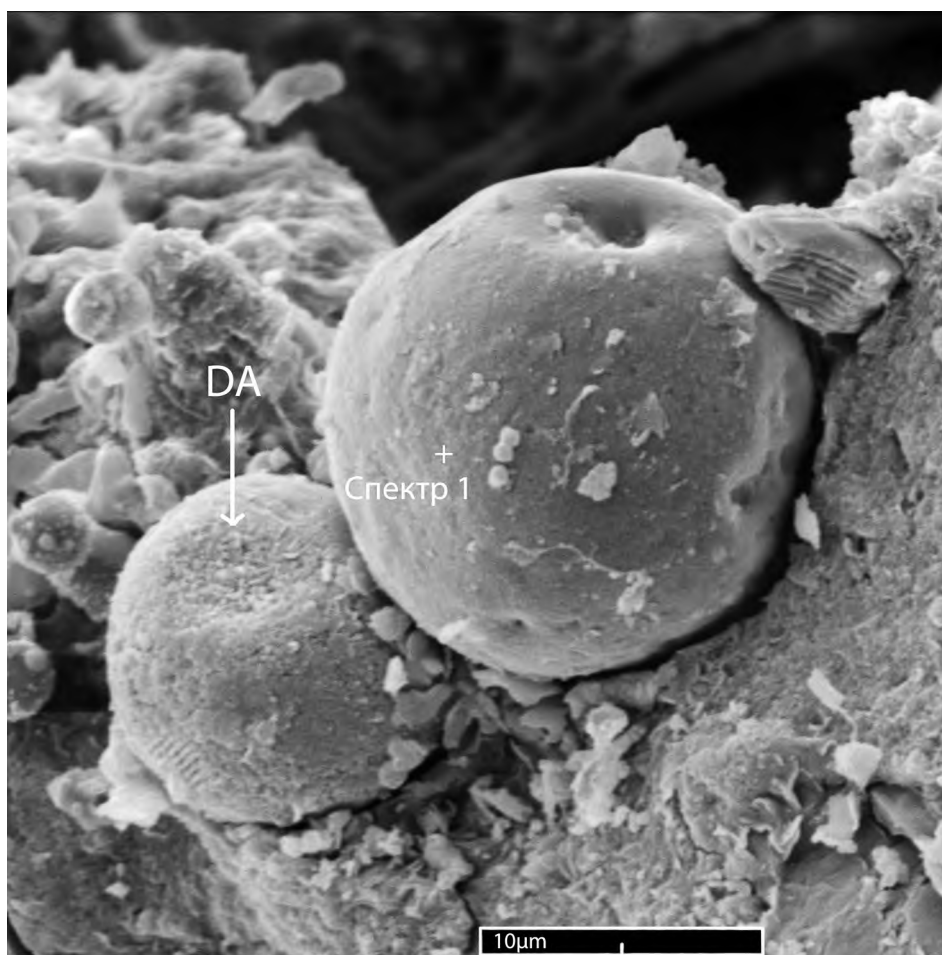
## Pl a t e X X

Spherical forms with pores, presumably prasinophytes; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/3.

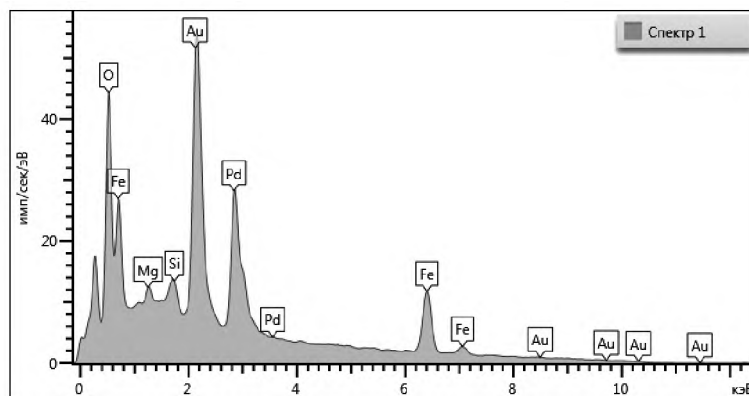
Fig. 1. Two spherical cells with pores, DA – damaged area of the wall .

Fig. 2. EDS spectrum of the large cell.

Fig. 3. Semiquantitative elements composition.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
O	16.77	0.44
Mg	0.59	0.12
Si	0.71	0.11
Fe	30.79	0.81
Pd	21.11	0.66
Au	30.02	0.69
Сумма/Total:	100.00	

3



## Таблица XXI

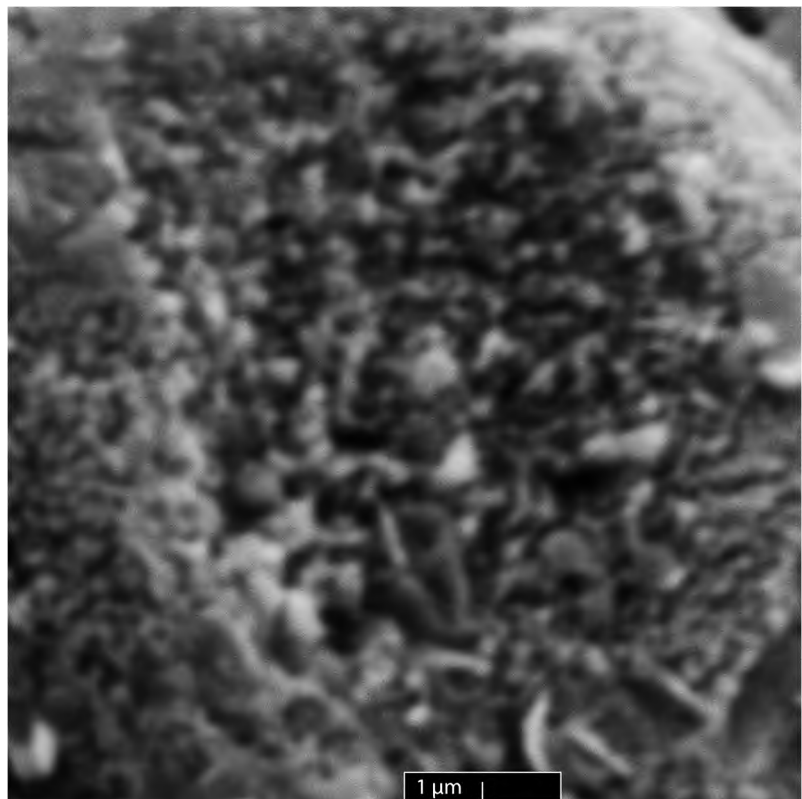
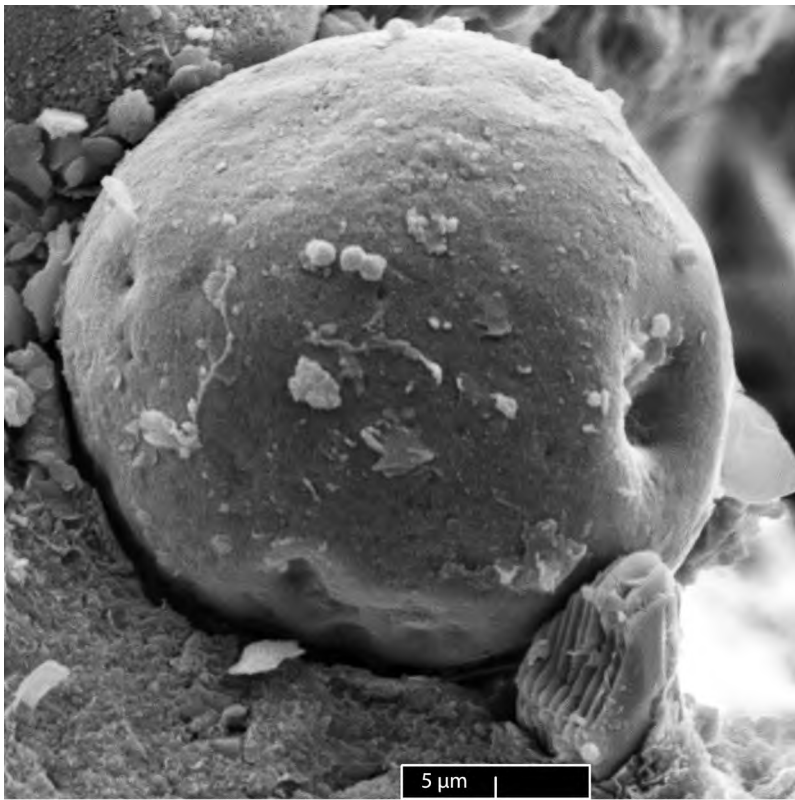
Фиг. 1. Увеличенное изображение большей клетки сферической формы с порами (см. табл. XX, фиг. 1); метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/3.

Фиг. 2. Крупный план поврежденного участка (DA) стенки эукариотической клетки меньшего размера (см. табл. XX, фиг. 1), видны заполняющие ее тонкие червеобразные структуры (фоссилизированные следы бактериальной переработки органического вещества клетки); метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/3.

## Plate XXI

Fig. 1. Enlarged image of large spherical cell with pores of pl. XX, fig. 1; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/3

Fig. 2. Close-up of damaged area (DA) of the wall of the smaller eukaryotic cell of pl. XX, fig. 1 showing worm-shaped structures (fossilized traces of bacterial processing of organic matter of the cell); Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/3.

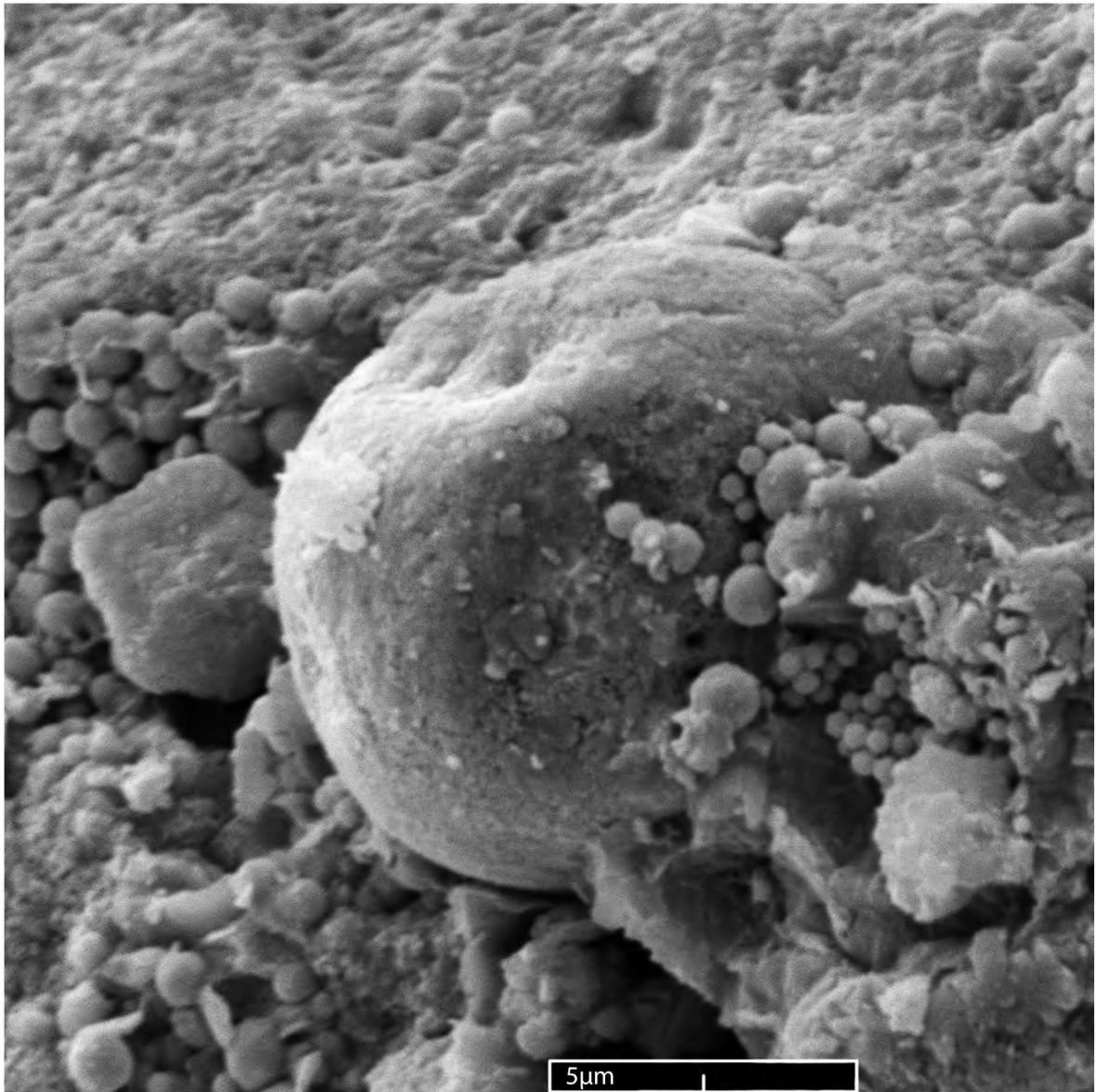


## Таблица XXII

Фиг. 1. Эукариотическая клетка сферической формы, предположительно прازیнофит, видны поры; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/3.

## Plate XXII

Fig. 1. Spherical eukaryotic cell, presumably prasinophyte, pores are visible; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/3.



1

### Т а б л и ц а X X I I I

Фиг. 1. Эукариотическая клетка сферической формы, в верхней части которой видна пора; предположительно прازیнофит; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

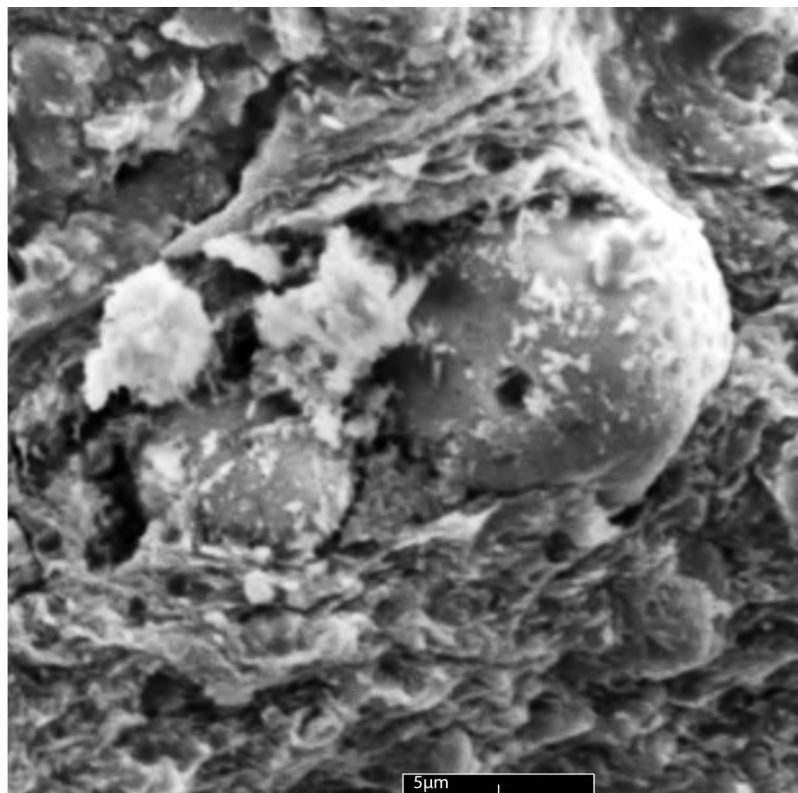
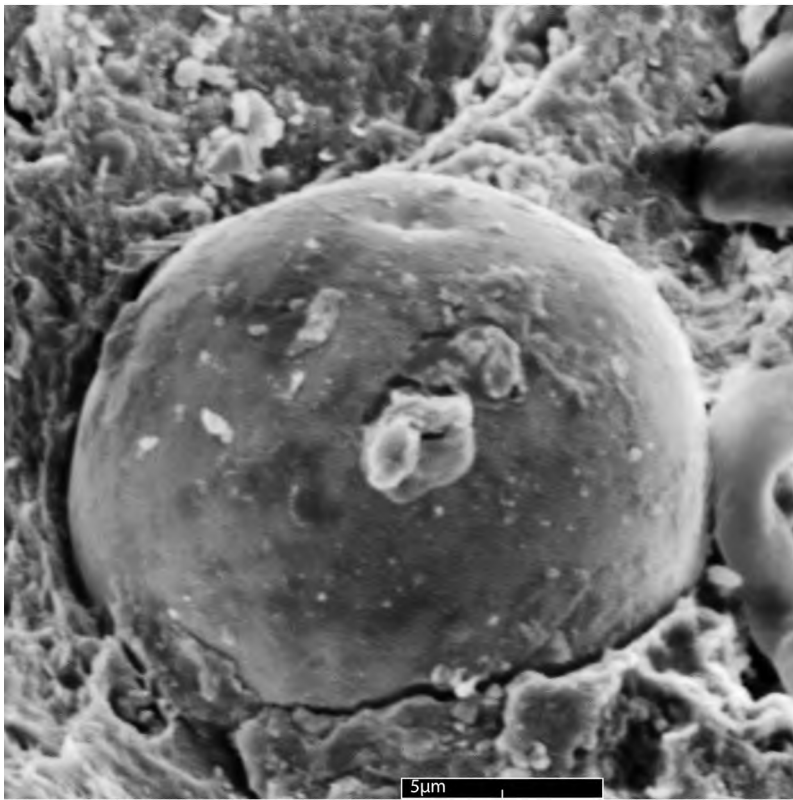
Фиг. 2. Две сферические клетки (на поверхности более крупной из них (справа) видна пора) предположительно прازیнофиты; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

### Plate XXIII

Fig. 1. Spherical eukaryotic cell, in the upper part of which is a pore; presumably prasinophyte; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.

Fig. 2. Two spherical cells (pore visible on surface of the larger cell on right), presumably prasinophytes; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.





## Таблица XXIV

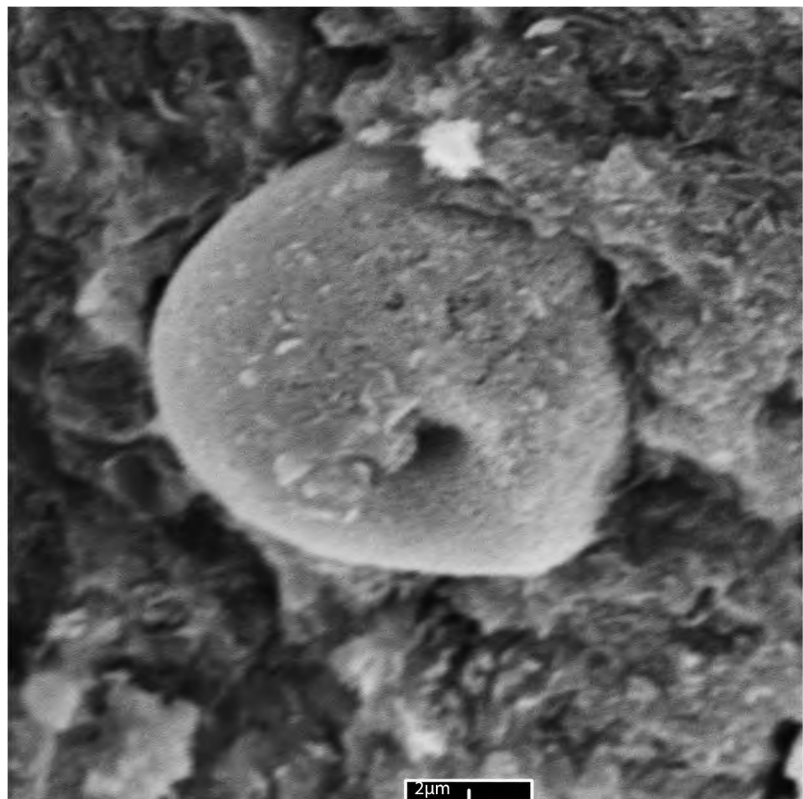
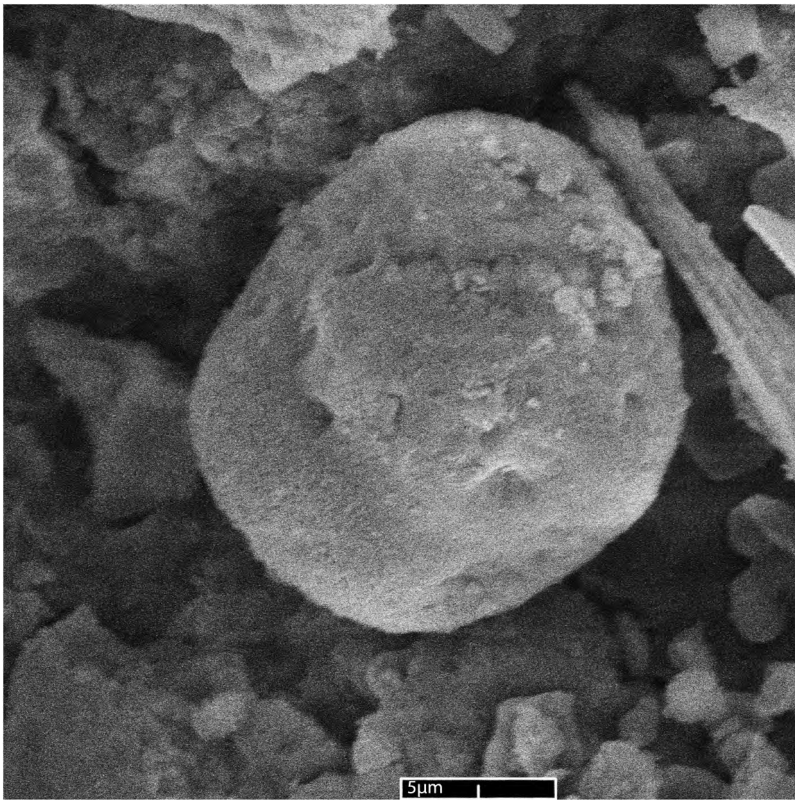
Фиг. 1. Эукариотическая клетка с порами, предположительно прازیнофит; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/4.

Фиг. 2. Эукариотическая клетка формы с порой, предположительно прازیнофит; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

## Plate XXIV

Fig. 1. Eukaryotic cell with pores, presumably prasinophyte; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/4.

Fig. 2. Eukaryotic cell with pore, presumably prasinophyte; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.



## Таблица XXV

Фиг. 1. Празиофит, трубчатая форма; видна двойная стенка с порами; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/9.

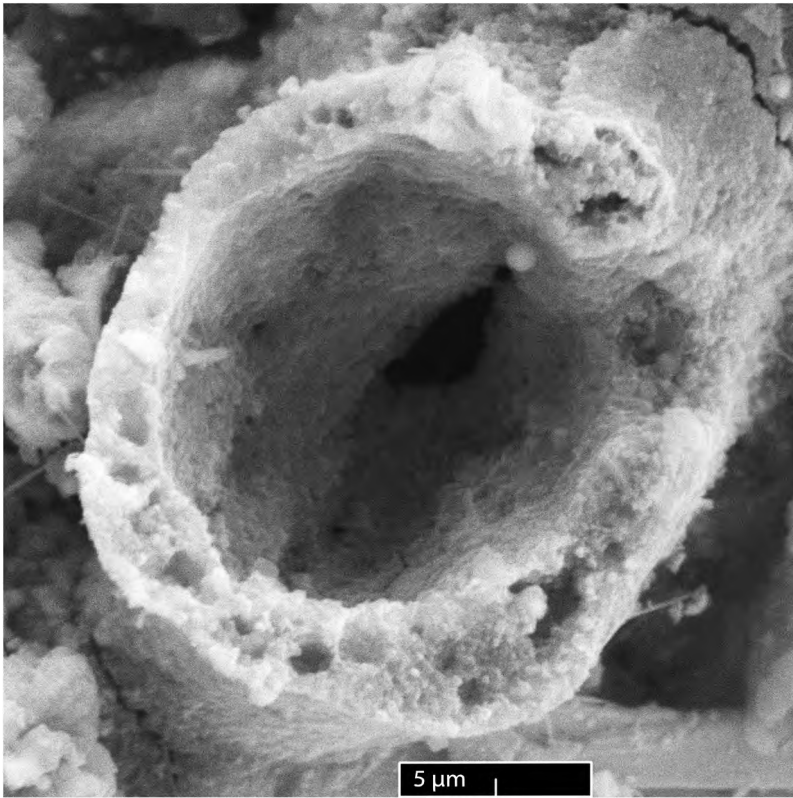
Фиг. 2. Колония прازیнофітов; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/9.

## Plate XXV

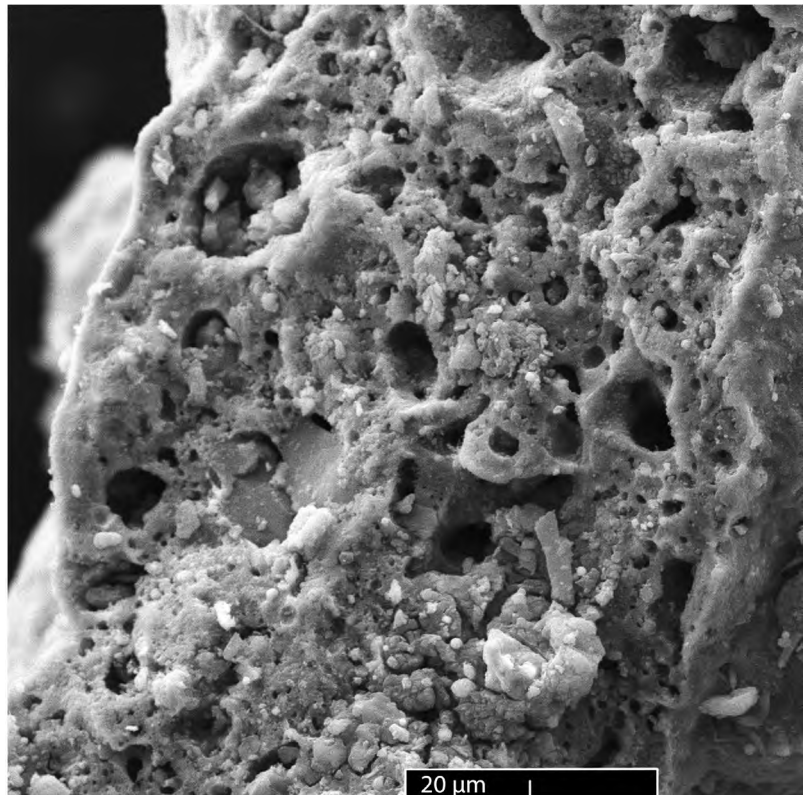
Fig. 1. Prasinophyte, tubular form; double wall with pores is visible; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/9

Fig. 2. Colony of prasinophytes; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/9.





1



2

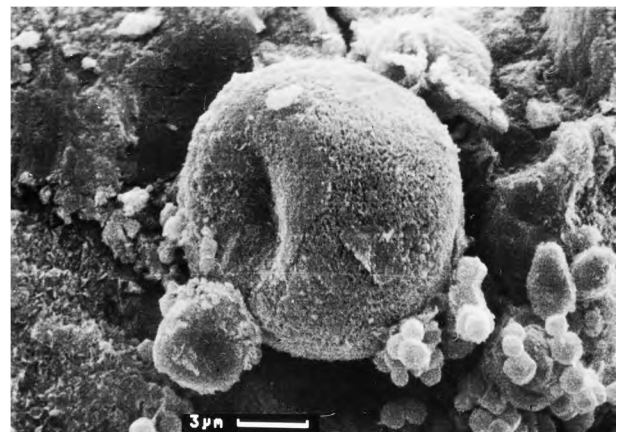
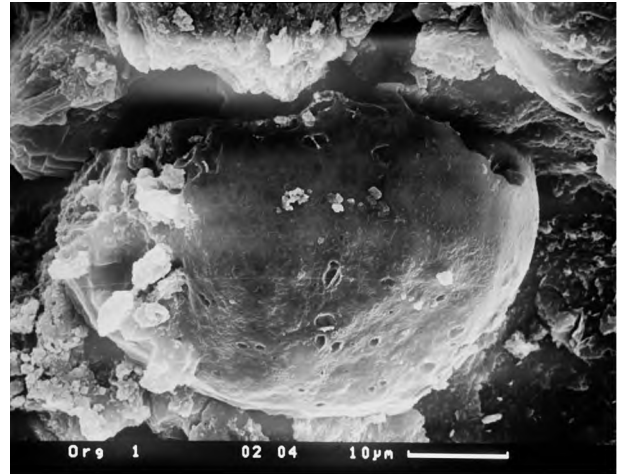
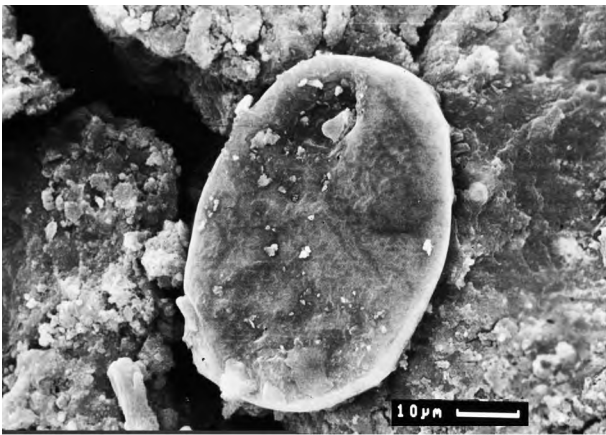


## Таблица XXVI

Фиг. 1–4. Эукариотические клетки в метеорите Оргей: предположительно протисты царства Альвеоляты (фиг. 1 и 4) и водоросли класса Празиофиты (фиг. 2 и 3); на фиг. 3 также виден цианобактериальный чехол.

## Plate XXVI

Figs. 1–4. Eukaryotic cells in the Orgueil meteorite: presumably protists of Kingdom Alveolata (figs. 1 & 4) and algae of Class Prasinophyceae (figs. 2 & 3); fig. 3 also shows a cyanobacterial sheath.

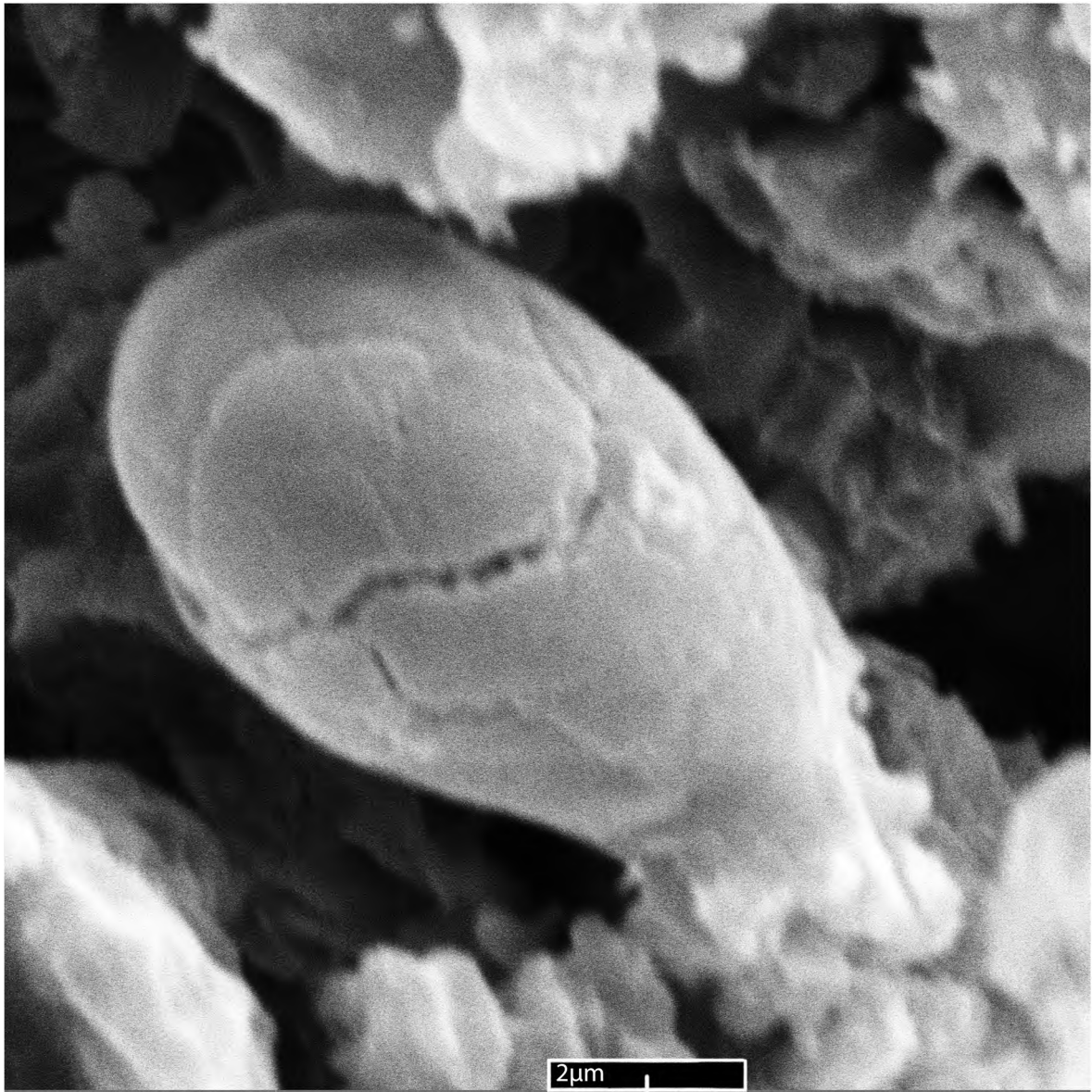


**Т а б л и ц а X X V I I**

Фиг. 1. Раковина (панцирь) раковинной амебы; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/7.

**Plate XXVII**

Fig. 1. Shell (test) of testate amoeba; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/7.



### Таблица XXVIII

Фиг. 1. Два панциря пеннатных диатомей; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/6.

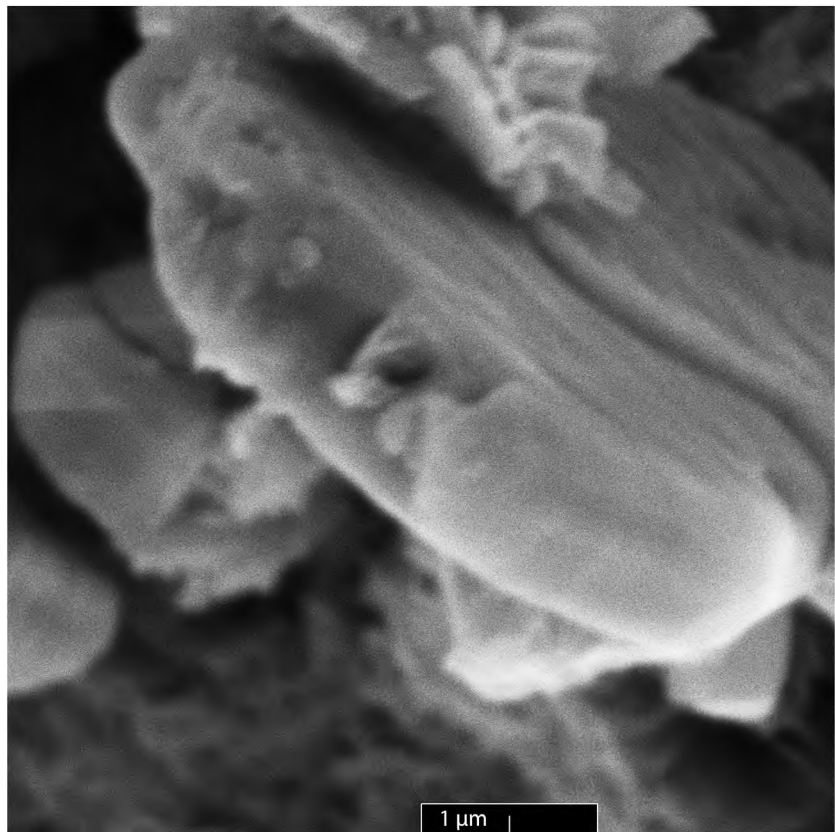
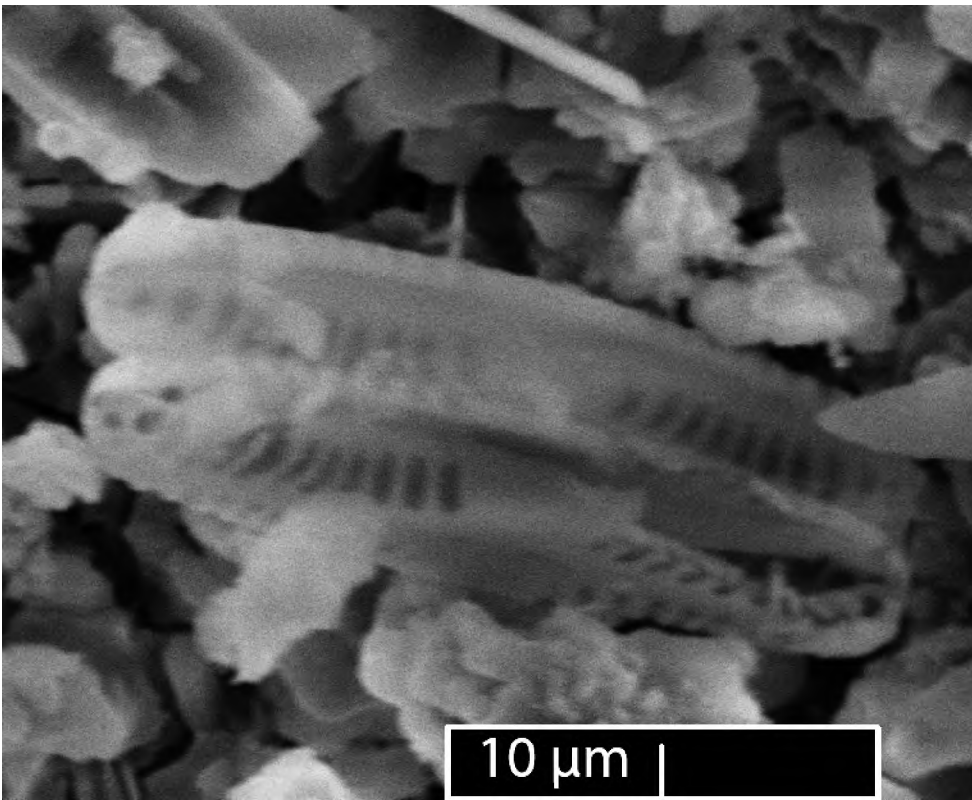
Фиг. 2. Пеннатная диатомея, покрытая эпсомитом; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

### Plate XXVIII

Fig. 1. Two frustules of pennate diatoms; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/6.

Fig. 2. Pennate diatom encased within coating of epsomite; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.





## Т а б л и ц а X X I X

Панцирь диатомеи со сколом; метеорит Оргей, ОИЯИ, образец 1/7, Au напыление.

Фиг. 1. Фрагмент панциря пеннатной диатомеи.

Фиг. 2. ЭДС-спектр панциря диатомеи в точке X.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

## Pl a t e X X I X

Fractured frustule of pennate diatom, Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/7, Au coating.

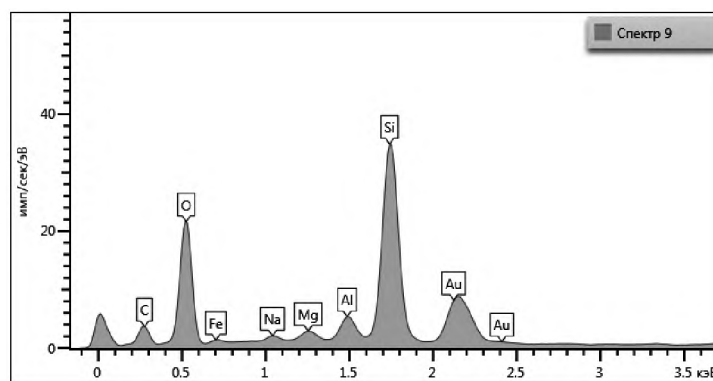
Fig. 1. Fragment of frustule of pennate diatom.

Fig. 2. EDS spectrum of the frustule at spot X.

Fig. 3. Semiquantitative element content.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
C	12.09	0.59
O	36.30	0.54
Na	0.80	0.10
Mg	0.97	0.09
Al	2.45	0.11
Si	22.05	0.33
Fe	3.21	0.61
Au	22.13	0.58
Сумма/Total:	100.00	

3

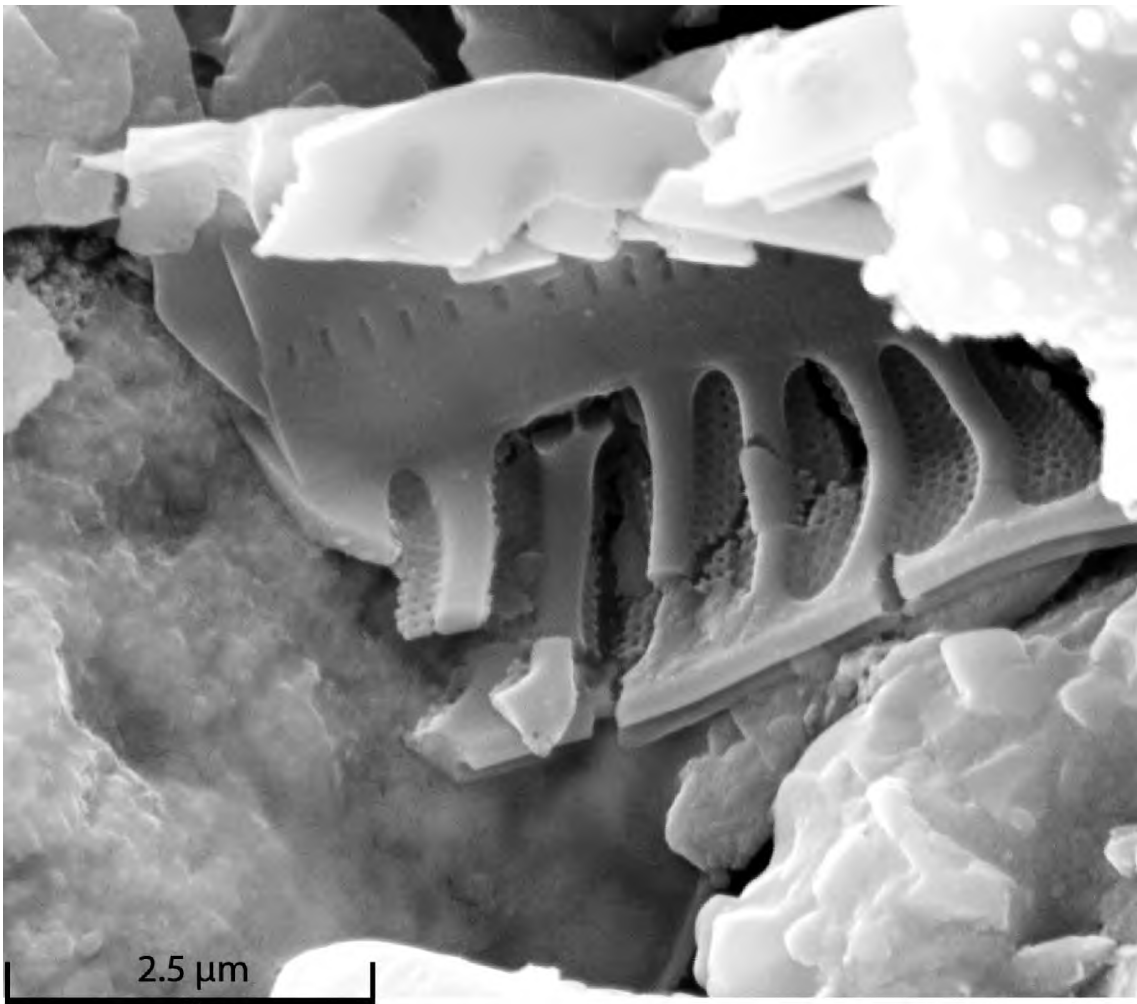
**Т а б л и ц а X X X**

Фиг. 1. Фрагмент панциря диатомеи, хорошо видны ребра, кривумы и ареолы; метеорит Оргей, ОИЯИ, образец 1/14.

**Plate XXX**

Fig.1. A fragment of the shell of pennate diatom, showing costae, cribra and areolae; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/14.

1





### Таблица XXXI

Панцирь перминерализированной пеннатной диатомеи с гиалиновой центральной областью (фасцией), заключенный в минеральный матрикс метеорита; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/14, Au напыление.

Фиг. 1. СЭМ-изображение панциря диатомеи.

Фиг. 2. ЭДС-спектр фасции створки.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

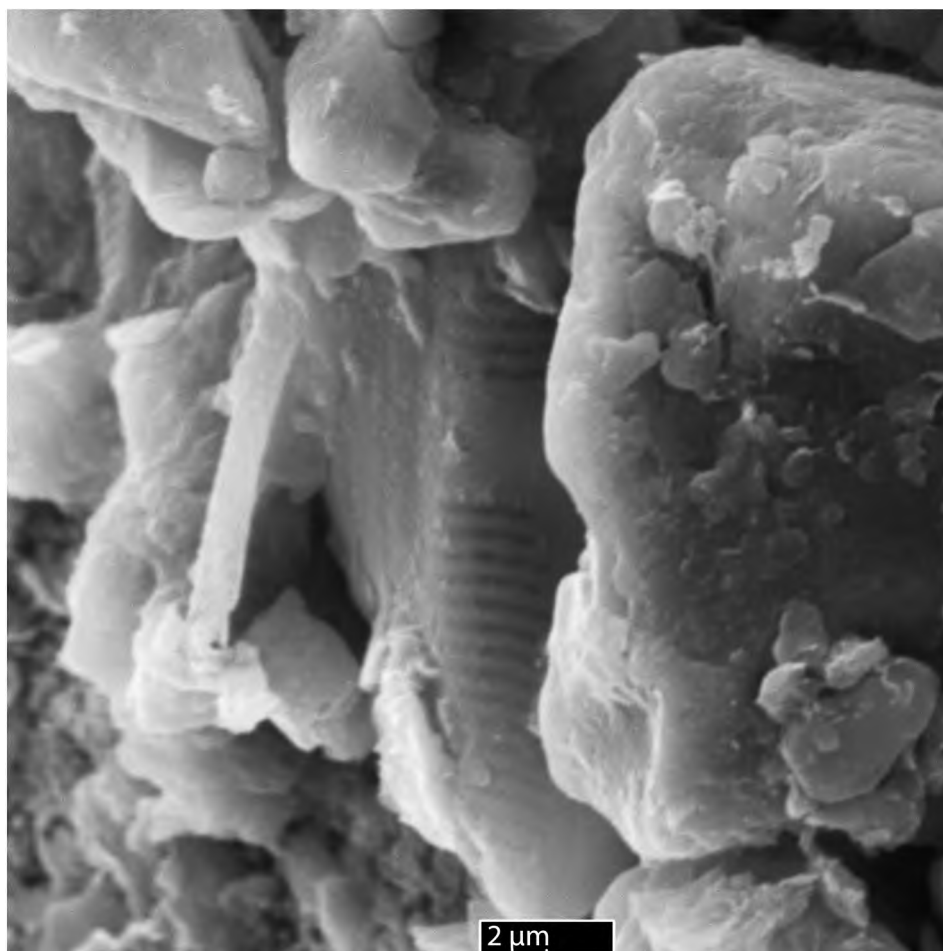
### Plate XXXI

Frustule of permineralized pennate diatom with hyaline central area (fascia) embedded in the meteorite rock matrix; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/14, Au coating.

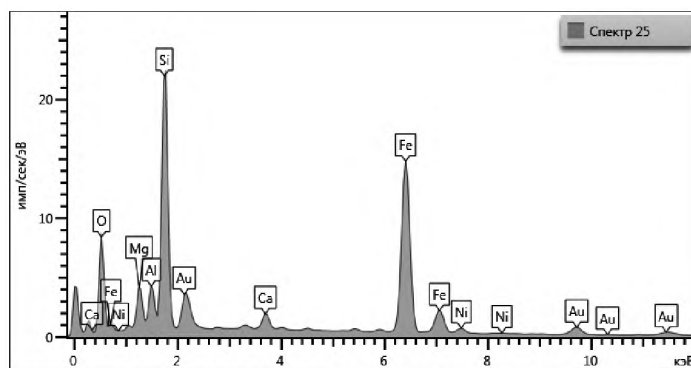
Fig. 1. SEM-image of the diatom shell.

Fig. 2. EDS-spectrum of the valve fascia.

Fig. 3. Semiquantitative element content.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
O	42.72	0.66
Mg	5.97	0.26
Al	4.47	0.21
Si	21.40	0.34
Ca	1.09	0.07
Fe	23.39	0.34
Ni	0.97	0.11
Сумма/Total:	100.00	

3

## Таблица XXXII

Крупная (около 40 мкм) эукариотическая клетка мешковидной формы со складками смятия, метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/11.

Фиг. 1. СЭМ-изображение.

Фиг. 2. ЭДС-спектр демонстрирует высокое содержание углерода и серы.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

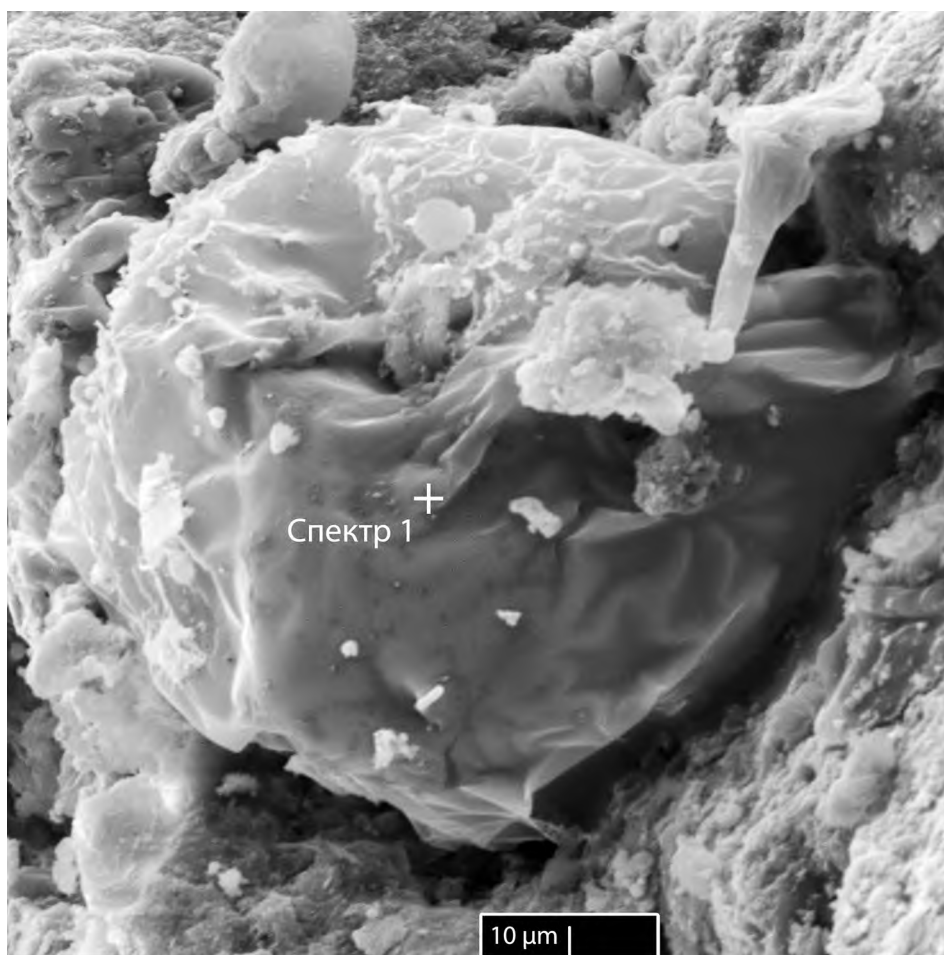
## Plate XXXII

Large (~40 microns) bag-shaped eukaryotic cell with wrinkles; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/11.

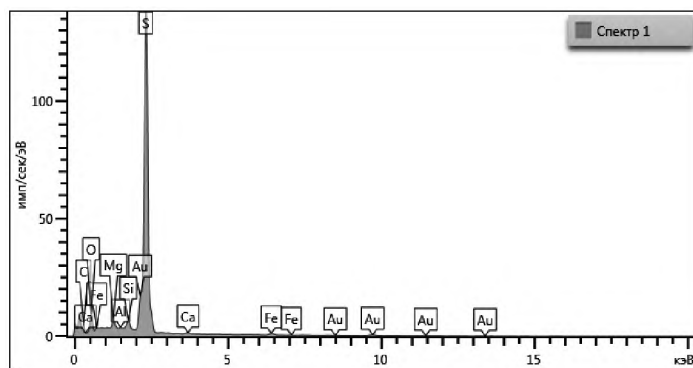
Fig. 1. SEM-image of the cell.

Fig. 2. EDS-spectrum shows high content of carbon and sulfur.

Fig. 3. Semiquantitative element content.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
C	28.28	2.12
O	15.65	0.81
Mg	0.98	0.10
Al	0.23	0.07
Si	0.96	0.09
S	51.89	1.60
Ca	0.31	0.10
Fe	1.70	0.24
Сумма/Total:	100.00	

3

### Таблица XXXIII

Фиг. 1. Мешковидная форма со складкой смятия, возможно акритарх; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр 1/14.

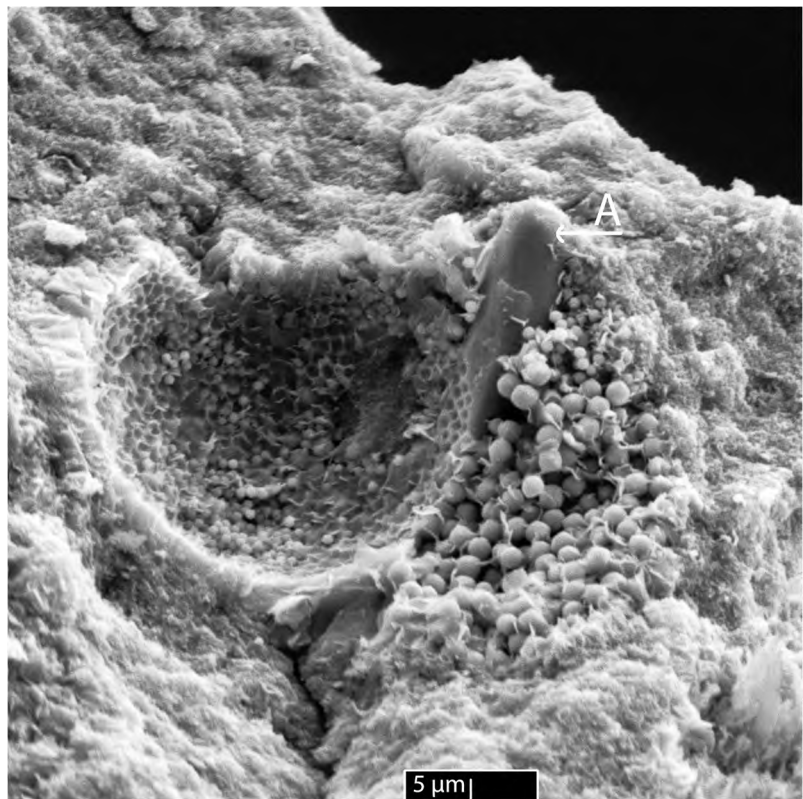
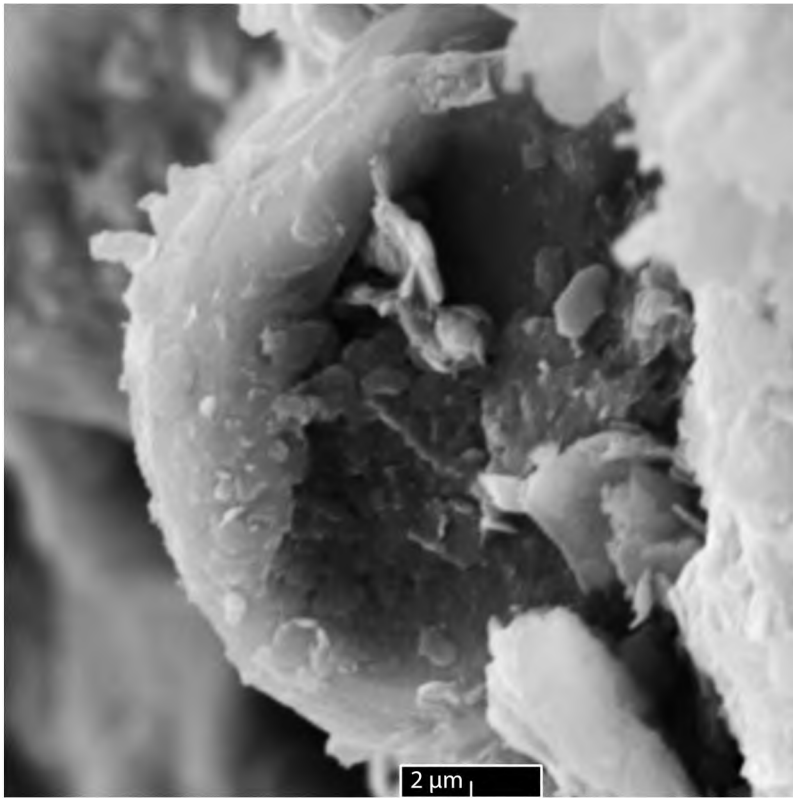
Фиг. 2. Фрагмент стенки полого сферического объекта (эукариотической клетки) диаметром около 19 мкм с коротким отростком (А); толщина стенки около 2–2,5 мкм; объект ранее был заполнен кристаллами магнетита, видны остатки органической плёнки; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр.1/7

### Plate XXXIII

Fig. 1. Sack-shaped form with a wrinkled fold, possibly an acritarch; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/14.

Fig. 2. Fragment of the wall of a hollow spherical form: possible eukaryotic cell (19 micron dia.) with a short process (A); wall thickness ~ 2–2.5 microns. This body was previously filled with magnetite crystals and the remains of organic film are visible; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/7.





### Таблица XXXIV

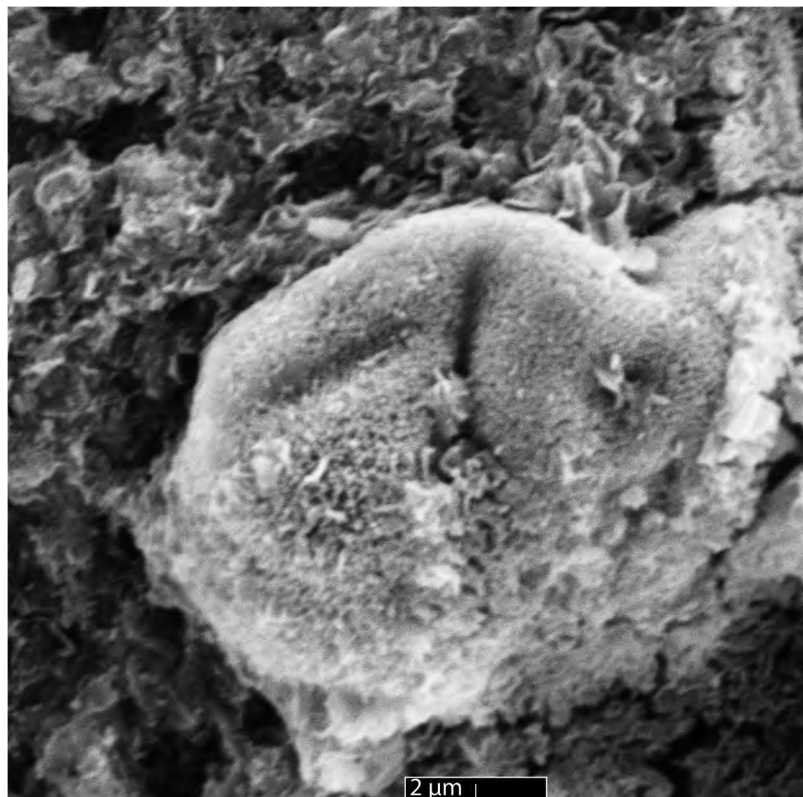
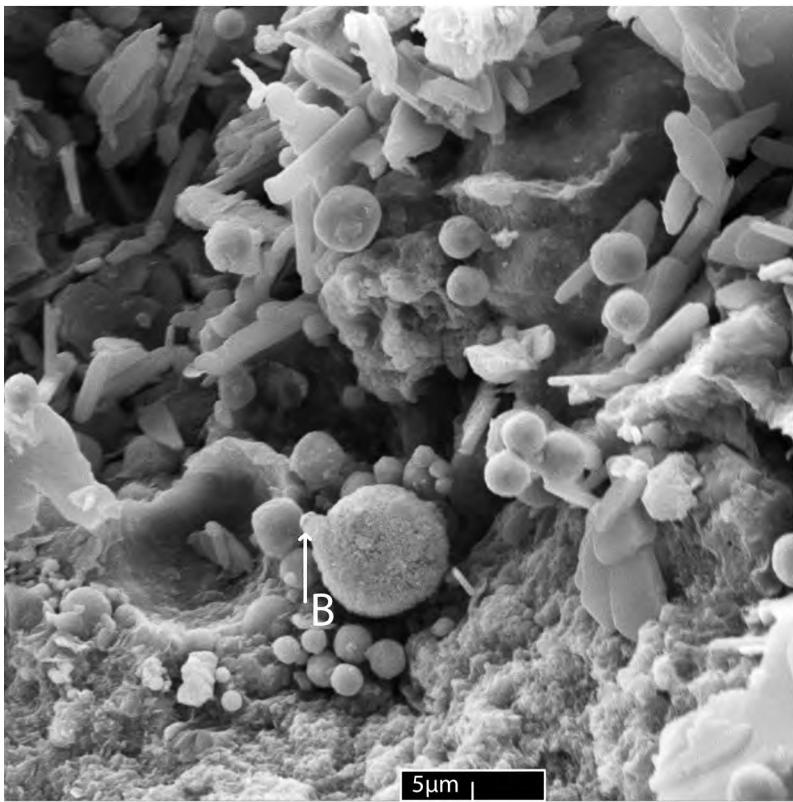
Фиг. 1 Эукариотические клетки сферической формы разной размерности (1–3 мкм); крупная клетка около 5 мкм в диаметре имеет короткий отросток (В); метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/7.

Фиг. 2. Мешковидная форма с бороздами, напоминающими щель разверзания; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

### Plate XXXIV

Fig. 1. Spherical eukaryotic cells of different dimensions (1-3 microns); a large cell about 5 microns in diameter has a short process (B); Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/7.

Fig. 2. Sack-shaped form with folds resembling a crevice; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.



### Т а б л и ц а X X X V

Спороподобная форма с ямками; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

Фиг. 1. СЭМ-изображение формы.

Фиг. 2. Ее ЭДС-спектр.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

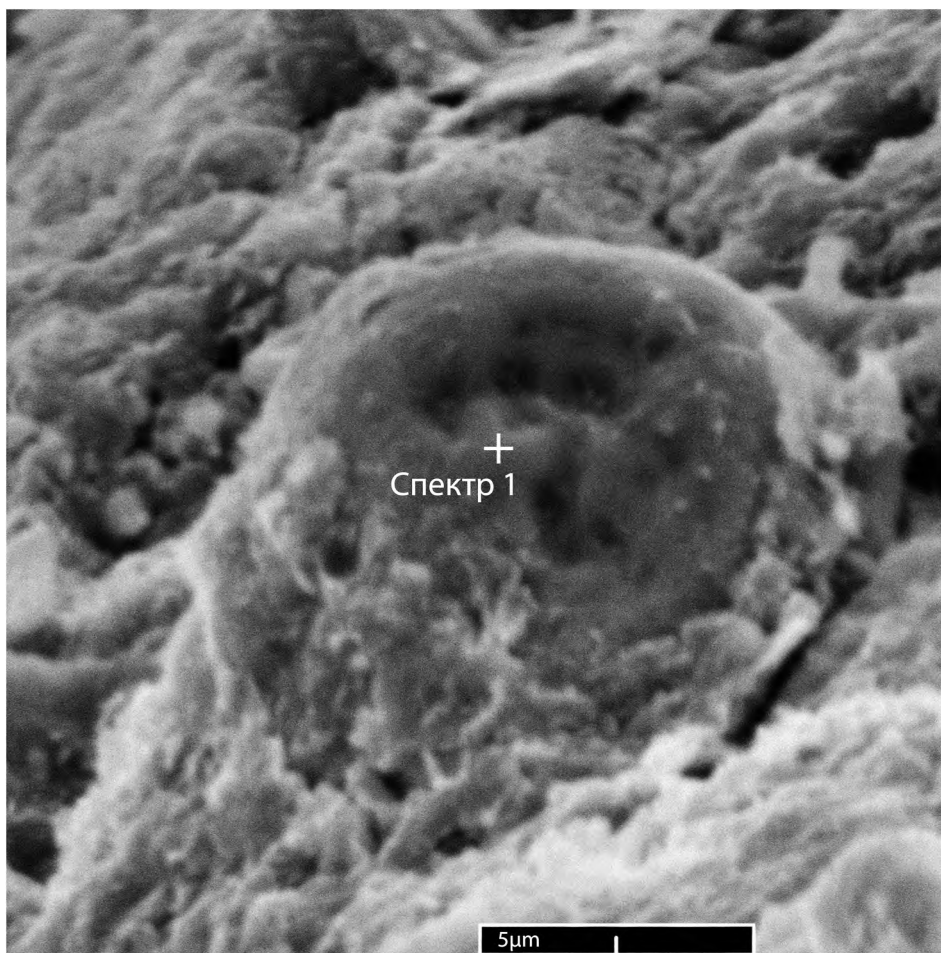
### Pl a t e X X X V

Spore-like form with fossae; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.

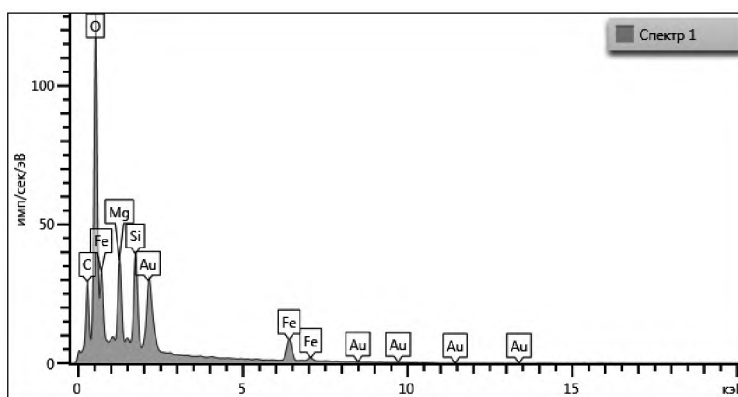
Fig. 1. SEM-image of the form.

Fig. 2. Its EDS spectrum.

Fig. 3. Semiquantitative element content.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
C	13.80	0.54
O	40.86	0.55
Mg	6.14	0.16
Si	6.43	0.16
Fe	19.26	0.59
Au	13.51	0.55
Сумма/Total:	100.00	

3



## Т а б л и ц а X X X V I

Спороподобная форма с ямками; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/2.

Фиг. 1. СЭМ-изображение формы.

Фиг. 2. ЭДС-спектр формы.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

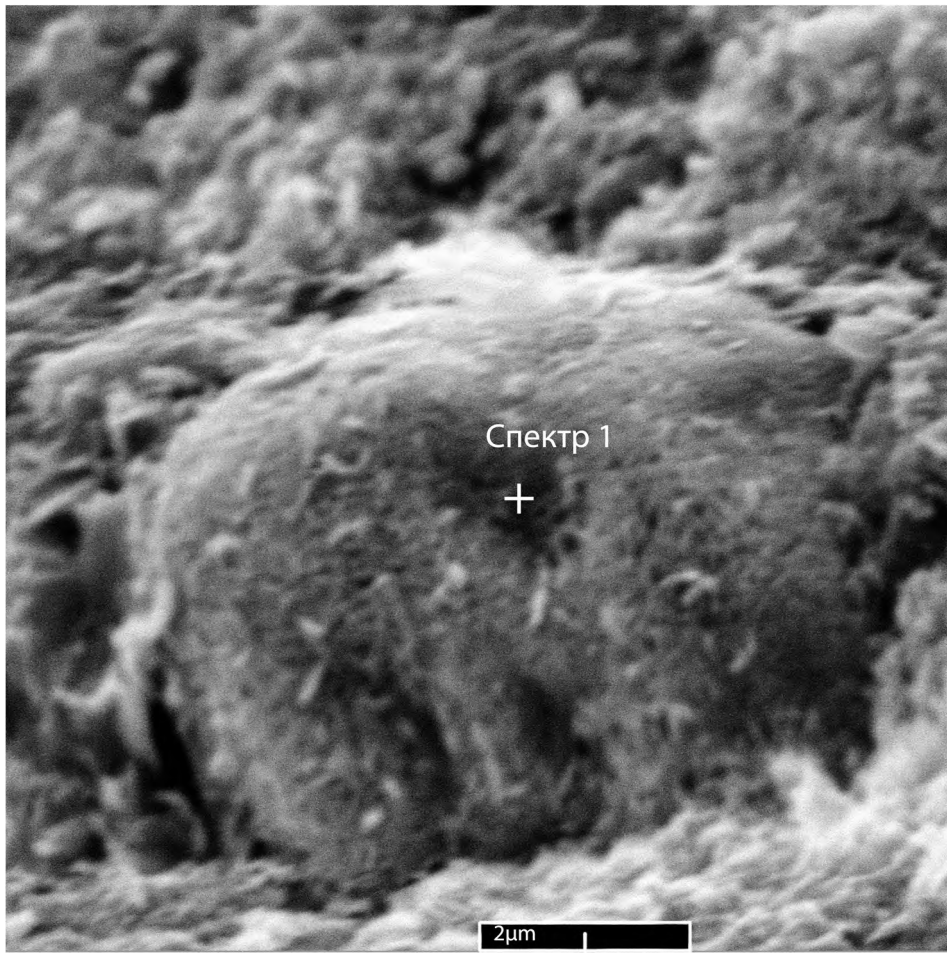
## P l a t e X X X V I

Spore-like form with fossae; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.

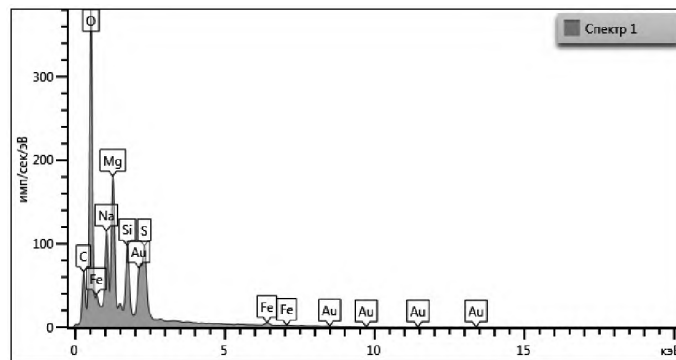
Fig. 1. SEM-image of the form.

Fig. 2. EDS spectrum of the form.

Fig. 3. Semiquantitative element content.



1



2

Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
C	13.46	0.64
O	42.63	0.54
Na	6.23	0.18
Mg	9.65	0.19
Si	4.97	0.13
S	6.92	0.23
Fe	2.72	0.36
Au	13.41	0.56
Сумма/Total:	100.00	

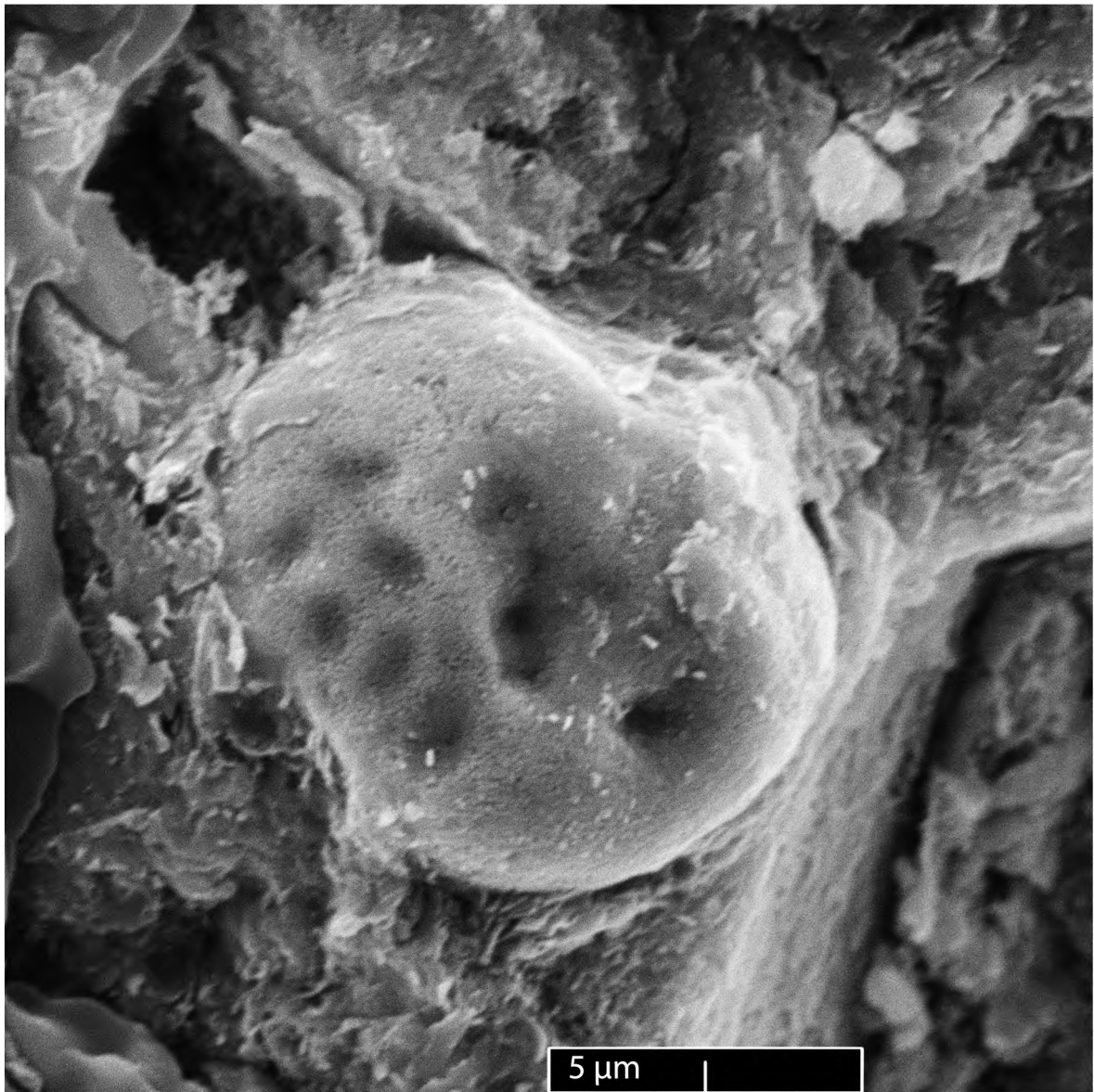
3

**Т а б л и ц а X X X V I I**

Фиг. 1. Спороподобная форма с ямками; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр.1/2.

**Pl a t e X X X V I I**

Fig. 1. Spore-like form with fossae; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/2.



1

## Таблица XXXVIII

Эукариотическая клетка (?) неясного систематического положения, очертание эллипсоидное, обладает билатеральной симметрией (на уплощенной поверхности видны симметрично-расположенные борозды); метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5.

Фиг. 1. СЭМ-изображение.

Фиг. 2. ЭДС-спектр.

Фиг. 3. Полуколичественное содержание присутствующих элементов.

## Plate XXXVIII

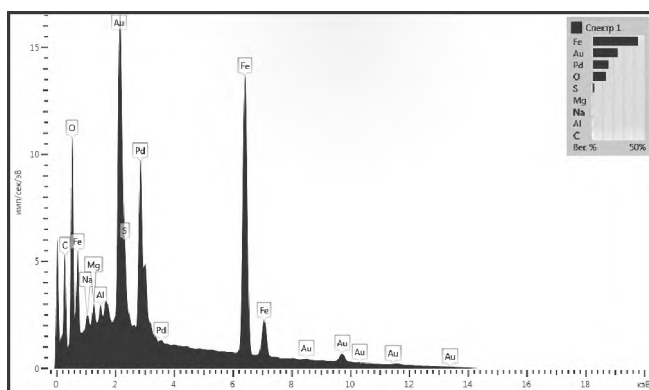
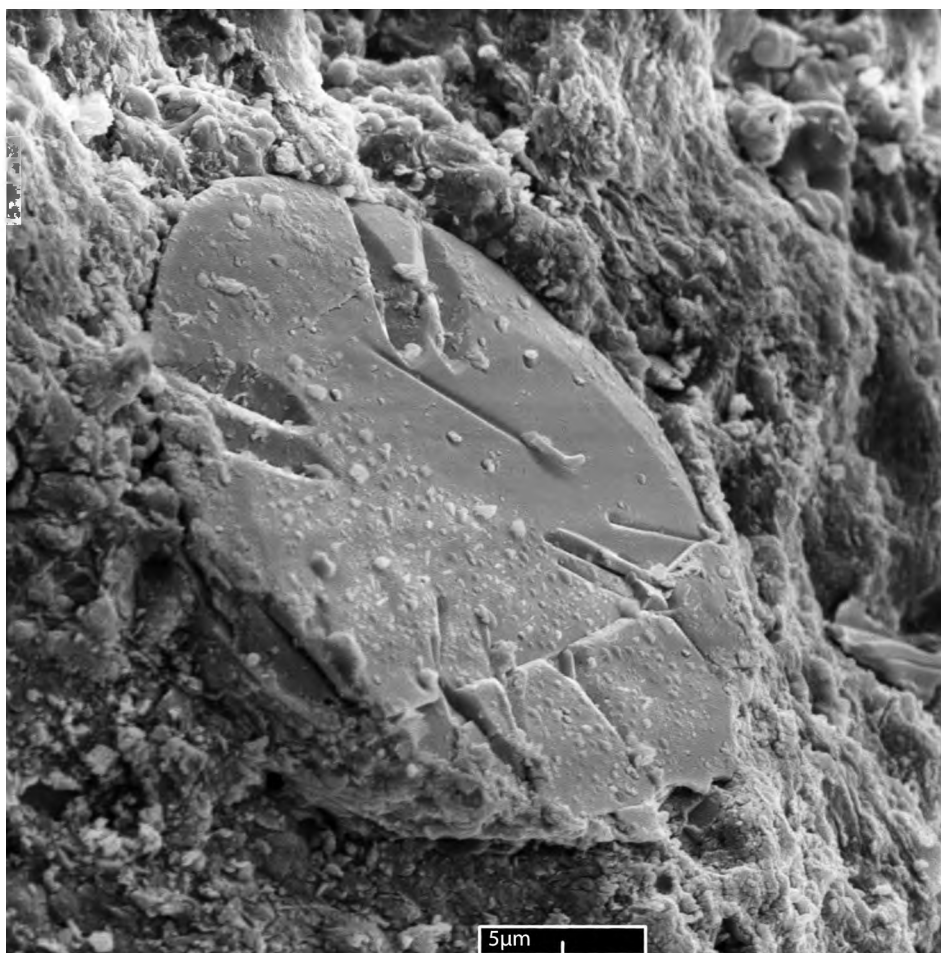
Eukaryotic cell (?) of uncertain systematic position with ellipsoidal outline, has bilateral symmetry (symmetrically located grooves are visible on the flattened surface); Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5.

Fig. 1. SEM image.

Fig. 2. EDS spectrum.

Fig. 3. Semiquantitative element content





Элемент/Element	Вес/Weight, %	σ-вес/σ-weight, %
C	0.00	0.62
O	12.92	0.13
Na	0.51	0.05
Mg	0.59	0.04
Al	0.43	0.03
S	2.14	0.06
Fe	43.50	0.21
Pd	15.60	0.16
Au	24.31	0.22
Сумма/Total:	100.00	

3

### Т а б л и ц а X X X I X

Предположительно эукариотическая форма: извитой морщинистый объект  
неясного систематического положения высоким содержанием алюминия;  
метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5, Au напыление.

Фиг. 1. СЭМ-изображение.

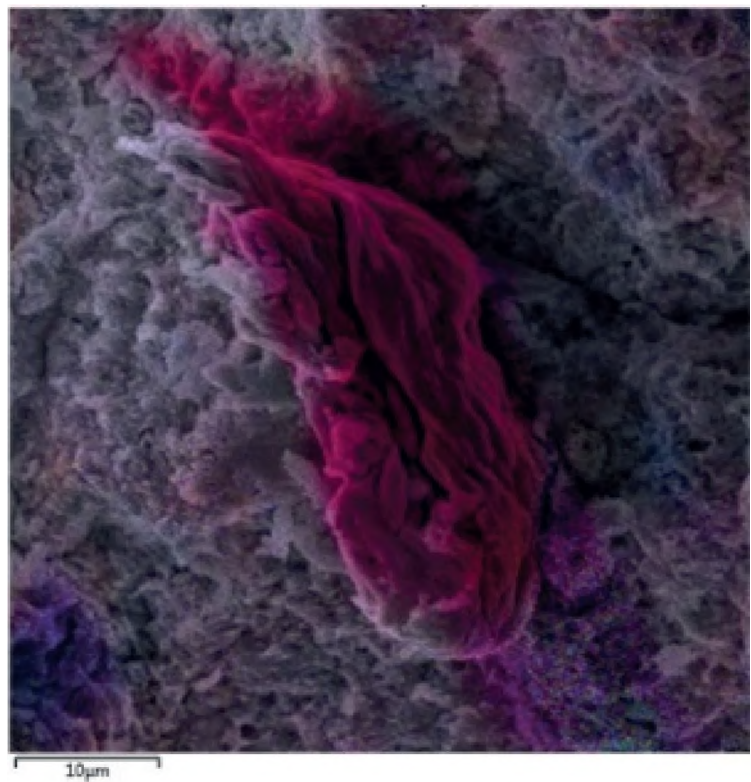
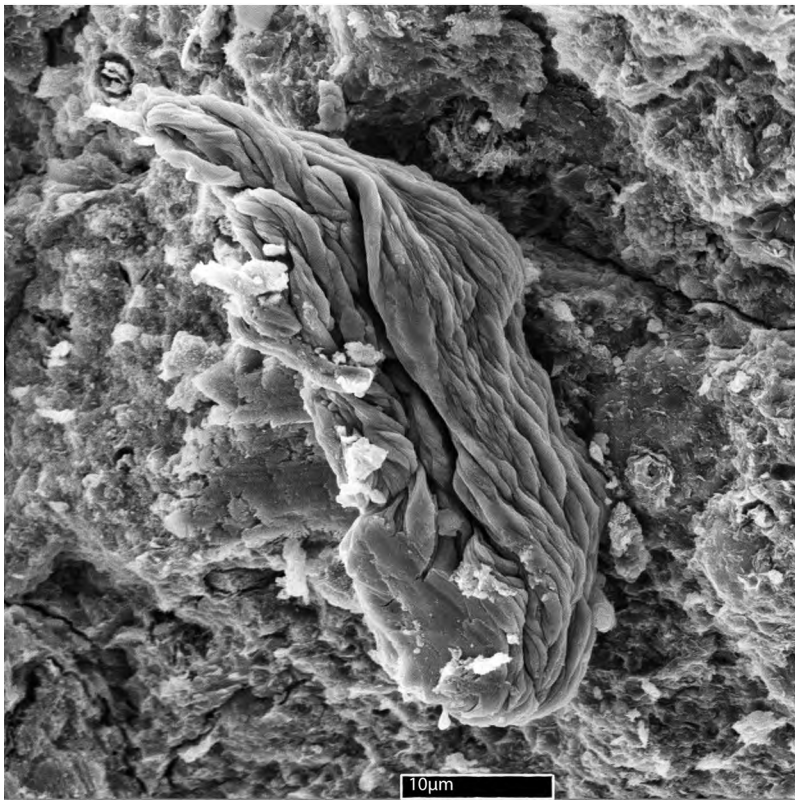
Фиг. 2. СЭМ-изображение с наложением двумерной ЭДС-карты распределения алюминия.

### Pl a t e X X X I X

Possible eukaryotic form: large twisted wrinkled object  
of unknown systematic position with high content of Aluminum;  
Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5, Au coating.

Fig. 1. SEM image.

Fig. 2. SEM image with overlay of EDS 2D aluminum distribution map.



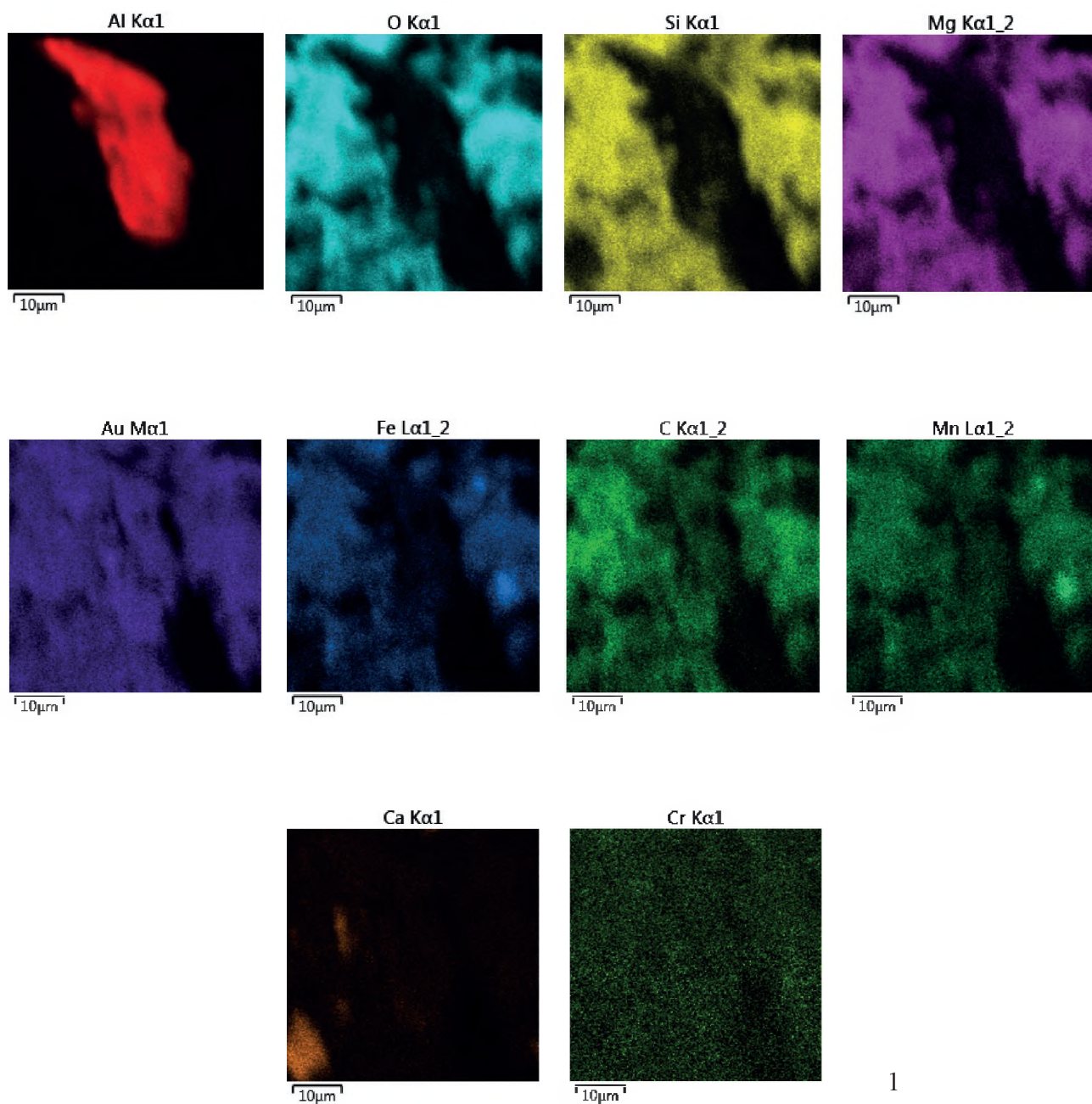
## Таблица XL

Фиг. 1. Двумерные ЭДС-карты распределения элементов объекта, изображенного в табл. XXXIX (каждая карта соответствует полному снимку табл. XXXIX, фиг. 2): значительно повышенное содержание алюминия; метеорит Оргей, ОИЯИ, обр. 1/5, напыление золотом.

## Plate XL

Fig. 1. EDS 2D distribution maps of the object shown in pl. XXXIX (each map corresponds to the complete image of pl. XXXIX, fig. 2): significantly increased aluminum content; Orgueil meteorite, JINR, specimen 1/5, Au coating.





1



ДЛЯ ЗАМЕТОК

## FOR NOTES

# НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Объединенный институт ядерных исследований  
Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН  
Институт микробиологии имени С.Н. Виноградского РАН  
Космический и Ракетный Центр Соединенных Штатов, Хантсвилл, Алабама, США  
Научный совет РАН по астробиологии

## МЕТЕОРИТ ОРГЕЙ (АТЛАС МИКРОФОССИЛИЙ)

А.Ю. Розанов, Р.Б. Хувер, Е.А. Красавин, О.С. Самылина,  
А.К. Рюмин, М.И. Капралов, Е.А. Сапрыкин, А.Н. Афанасьева

Ответственный редактор: А.Ю. Розанов

### Рецензенты:

М.В. Фронтасьева и В.А. Цельмович

На русском и английском языках.

Компьютерная верстка: М.К. Емельянова

Подписано в печать 6 октября 2020 г.  
Формат 70x100 1/8  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. п. л. 10. Уч.-изд. л. 8. Тираж 500 экз.

Отпечатано в «Типография офсетной печати»  
Москва, ул. Дербеневская, д. 20, стр. 8  
Заказ № 353