

Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория радиационной биологии
Лаборатория нейтронной физики
Научный совет по астробиологии при Президиуме РАН
Рабочая группа по исследованию космической пыли

Публикуется на правах рабочего материала

**ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА ЗЕМЛЕ
(К программе исследования)**

Под редакцией Н. Г. Бочкарева

Составители Л. М. Гиндилис и М. И. Капралов

Дубна, 2014

- П78 **Проблемы** изучения космической пыли на Земле (К программе исследования) / Под ред. Н. Г. Бочкарева; сост. Л. М. Гиндилис, М. И. Капралов. — Дубна: ОИЯИ, 2014. — 87 с., ил.

В настоящем издании представлены рекомендации собрания Рабочей группы по исследованию космической пыли (РГКП) от 28 марта 2013 г. Они ориентированы на изучение космической пыли (КП) в различных природных планшетах *на Земле*, касаются проблемы сбора КП в верхней атмосфере и околоземном пространстве, а также ее астрономических аспектов. На важность исследования КП указывал В. И. Вернадский, под руководством которого в 1941 г. была сформирована Программа исследования космического вещества. Актуальность этой программы была подтверждена Э. А. Галимовым в докладе на заседании Президиума РАН 12 марта 2003 г. В настоящее время исследования космической пыли ведутся в различных научных учреждениях. Они носят разрозненный характер. Цель данных предложений к программе исследований — объединить и скоординировать усилия специалистов из разных областей знания. Программа носит комплексный характер. Она определяет направления и методы исследования КП. Особое внимание уделяется методике выделения космогенной компоненты из собранных образцов пыли.

Problems of Investigations of Cosmic Dust on Earth (For the Investigation Program) / Ed. N. G. Bochkarev; Comp. L. M. Gindilis, M. I. Kapralov. — Dubna: JINR, 2014. — 87 p., il.

This publication presents the recommendations of the Working Group meeting on the study of cosmic dust (WGCD) of March 28, 2013. They are focused on the study of cosmic dust (CD) in different natural habitats on Earth, deal with the problem of collecting CD in the upper atmosphere and near-Earth space as well as with astronomical aspects of the problem. The importance of the study of CD was pointed out by V. I. Vernadsky under whose leadership in 1941 the Program on investigation of cosmic matter was formed. The relevance of this program was confirmed by E. A. Galimov in his report at a meeting of the Presidium of the Russian Academy of Sciences in March 12, 2003. At present, investigations of CD are conducted in various academic institutions. They bear features of irregular research. The aim of these proposals to the research program is to unite and coordinate the efforts of experts from different fields of knowledge. The program is comprehensive. It determines the directions and methods of studying CD. Particular attention is paid to the method of extraction of cosmogenic component from the collected dust samples.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение <i>Л. М. Гиндилис</i>	6
2. Направления исследования космической пыли на Земле <i>С. А. Булат, Л. М. Гиндилис, В. А. Цельмович</i>	11
3. Астрономические аспекты исследования КП <i>Н. Г. Бочкарев, Н. В. Воцинников, Л. М. Гиндилис</i>	12
4. Геологические аспекты исследования КП	14
4.1. Исследование ископаемой пыли <i>В. А. Цельмович</i>	14
4.2. Исследование раннедокембрийских кор выветривания.	19
4.2.1. Идентификация раннедокембрийских кор химического выветривания <i>Ю. Д. Пушкарев, Н. А. Алфимова</i>	19
4.2.2. Роль биогенного фактора в формировании раннедокембрийских кор выветривания <i>М. М. Астафьева, А. Ю. Розанов</i>	21
5. Исследование космической пыли в снежном и ледовом покрове Арктики и Антарктики.	24
5.1. Сбор образцов снега и льда в Антарктике <i>Е. С. Булат, С. А. Булат, Л. М. Гиндилис</i>	24
5.2. Сбор образцов снега и льда в Арктике <i>Е. С. Булат, С. А. Булат, Л. М. Гиндилис, А. С. Петров</i>	25
5.3. Пробоподготовка и исследование КП в снежном и ледовом покрове Антарктики и Арктики <i>С. А. Булат, В. Я. Липенков</i>	26
6. Сбор и исследование образцов в снежном покрове и ледниках высокогор- ных районов	29
6.1. Предложения к «Программе работ по исследованию космической пыли» <i>М. В. Лобанков</i>	29
6.2. Предложения к программе исследования КП <i>В. Ю. Прокофьев</i>	30
6.3. Программа РГКП по исследованию космической пыли на 2013–2017 гг. <i>В. М. Лобанков, В. Ю. Прокофьев</i>	31
7. Сбор и исследование растительных образцов — мхов сфагнум бурый (<i>Sphagnum fuscum</i> Klingr).	32
7.1. Методика сбора образцов <i>А. П. Бояркина</i>	32

7.2. Аналитические исследования образцов торфа сфагнум <i>М. В. Фронтасьева</i>	33
8. Сбор КП в верхней атмосфере и околоземном пространстве	34
8.1. Возможность сбора КП на КА «Бион» и «Фотон» <i>Е. А. Ильин, Л. М. Гиндилис, С. А. Булат, В. Н. Снытников</i>	34
8.2. Сбор КП с помощью МКС <i>Л. М. Гиндилис, В. Н. Снытников</i>	35
8.3. Разработка ловушек для КА <i>В. А. Игрицки, В. И. Майорова, В. Н. Снытников</i>	35
9. Биологические аспекты исследования КП (по всем разделам) <i>Е. А. Воробьева, М. М. Астафьева, С. А. Булат, Е. А. Ильин, Е. А. Красавин, А. Ю. Розанов</i>	37
9.1. Перспективы исследования КП на МКС	39
9.2. Моделирование	39
9.3. Сбор материала	40
9.4. Методы анализа	41
10. Выделение космогенной компоненты <i>В. А. Цельмович, С. А. Булат</i>	44
10.1. Признаки космогенной составляющей в образцах пыли на Земле	44
10.2. Методы выделения космогенной составляющей	44
10.3. Процедура выделения	44
11. Методика исследования КП	46
11.1. Термомагнитный анализ <i>Д. М. Печерский</i>	46
11.2. Спектрофотометрия в отраженном свете <i>В. В. Бусарев</i>	50
11.3. Исследование КП методами ядерной физики <i>В. Н. Швецов, П. В. Седышев, М. В. Фронтасьева, И. А. Бобриков</i>	51
11.4. Исследование космической пыли методами нанотехнологий <i>Е. М. Егорова</i>	55
Приложения	60
Приложение 1. Космогонические аспекты исследования КП <i>В. Н. Снытников</i>	60
Приложение 2. Современные методы исследования микрообъектов вне- земного происхождения (учебный обзор) <i>В. И. Гроховский, Д. Г. Патрушева</i>	63
Приложение 3 (к разд. 4). Проект: Шкала «космических пылевых (мик- рометеоритных) событий» (Cosmic Dust Events, CDE) <i>О. А. Корчагин</i>	83
Приложение 4 (к разд. 5). Отбор проб снега и морского льда на косми- ческую пыль, 2011 г. <i>А. С. Петров</i>	86

Использованные сокращения

ААС (ААС) — атомно-абсорбционная спектроскопия

АСМ — атомно-силовая микроскопия

СЭМ — сканирующая электронная микроскопия

ДОЭ — дифракция обратно отраженных электронов

EBSD — системы для дифракции обратно отраженных (рассеянных) электронов

НАА (НАА) — нейтронный активационный анализ

ОЦК — объемно-центрированная кубическая (решетка)

ПСО — полосы селективного отражения

ТЭМ — трансмиссионная (просвечивающая) электронная микроскопия

ЭПГ — элементы платиновой группы

1. ВВЕДЕНИЕ

Л. М. Гиндилис

*Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

Под космической пылью (КП) понимают частицы твердого вещества размером от долей микрона до нескольких микрон. Космическая пыль заполняет межзвездное, межпланетное и околоземное пространство, пронизывает верхние слои земной атмосферы и, выпадая на поверхность Земли, является одной из форм материального (вещественного и энергетического) обмена в системе «Космос–Земля».

Первые упоминания в научной литературе о космической пыли на Земле относятся к шестидесятым годам XIX века, когда известный голландский полярный исследователь Норденшельд (А. Е. Nordenskjöld) обнаружил на поверхности льда порошкообразное вещество и предположил, что оно имеет космическое происхождение [1]. В 1870-х гг. по результатам экспедиции на судне «Челленджер» в глубоководных осадках Тихого океана были обнаружены округлые магнетитовые частицы, магнитные сферулы, впервые описанные Мюрреем (J. Murray) [2, 3], в отношении которых также было высказано предположение, что они имеют космическое происхождение.

В России в первой половине XX века на необходимость изучения космической пыли указывал В. И. Вернадский [4, 5]. В феврале 1941 г. он выступил с докладом «О необходимости организации научной работы по космической пыли» на заседании Комитета по метеоритам АН СССР [5]. В этом докладе Вернадский подробно обосновывает программу поисков и сбора вещества космической пыли, выпадающей на поверхность Земли, для решения задач геологии, геохимии и космогонии. Для изучения космической пыли, подчеркивал Вернадский, необходимо иметь достаточный материал для ее исследования. Организацию сбора космической пыли и научное исследование собранного материала он считал важнейшей научной задачей. Актуальность этой программы была подчеркнута Э. А. Галимовым в докладе на заседании Президиума РАН 12 марта 2003 г.

Современный подход к изучению космической пыли был сформулирован на конференции 1963 г. в США [6]. В СССР в послевоенные годы сбор и изучение космической пыли проводились на высокогорных вершинах [7], в Антарктиде [8], в месте падения Тунгусского метеорита [9]. В 1962 г. при

Сибирском отделении АН СССР была создана Комиссия по метеоритам и космической пыли, которую возглавил В. С. Соболев. Работы по изучению космической пыли в рамках этой комиссии проводились под руководством Н. В. Васильева. Значительный прогресс в изучении космической пыли в верхней атмосфере и околоземном пространстве был связан с применением космических средств (Т. Н. Назарова, В. И. Мороз и др.). В 1990-е гг. после распада СССР, развала советской экономики и катастрофического сокращения ассигнований на науку исследования космической пыли в России практически полностью прекратились. Прекратила существование и Комиссия по метеоритам и космической пыли при Сибирском отделении Академии наук. В 2000-е гг. исследование *ископаемой* космической пыли успешно проводилось учеными Института физики Земли РАН (А. Ф. Грачев, О. А. Корчагин, Д. М. Печерский, В. А. Цельмович и др.). Некоторые итоги изучения космической пыли на Земле были подведены на конференциях «100 лет Тунгусскому феномену», Москва, 2008 г. [10] и «Космическая пыль на Земле», Миасс, 2009 г. [11].

Космическая пыль существует в двух основных видах: межзвездная и межпланетная (более подробную детализацию см. в разд. 2). Межзвездная пыль оказывает существенное влияние на астрономические процессы. Она вызывает ослабление звездного света и его поляризацию. Оказывает влияние на звездообразование и другие процессы. На поверхности пылинок образуются молекулярные, в том числе органические соединения, поступающие в межзвездную среду. Размеры пылинок, в основном, от десятых долей микрона.

Межпланетная пыль имеет существенно более крупные размеры — в среднем несколько микрон (возможно, вплоть до 100 мкм). Она образуется в процессе распада комет, а также при дроблении астероидов. В межпланетной среде присутствуют также частицы межзвездной пыли. Вероятно, они попадают в Солнечную систему вследствие аккреции при ее прохождении через межзвездные газопылевые облака, а также под действием межзвездного ветра. При рассеянии света на частицах межпланетной пыли возникают такие оптические явления, как зодиакальный свет, фраунгоферова составляющая солнечной короны, зодиакальная полоса, противосияние. Рассеянием на пылинках обусловлена и зодиакальная составляющая свечения ночного неба. Поскольку межпланетная пыль вызывает явление зодиакального света, ее иногда называют зодиакальной пылью. А так как подобные частицы более крупного размера при прохождении через земную атмосферу вызывают явление метеоров, межпланетную пыль иногда называют метеорной.

Особый интерес представляет космическая пыль, выпадающая на поверхность Земли. Она обнаруживается в глубоководных морских и океанических отложениях, в ледовом и снеговом покрове Арктики и Антарктики, в снеговом покрове горных вершин, в толще земных пород и других природных планшетах. При исследовании вещества, выпадающего на поверхность Земли, мы сталкиваемся с телами различного размера и происхождения. Частицы размером от долей миллиметра до 10 мм и

массой от 10^{-4} г до нескольких граммов при пролете через атмосферу образуют хорошо известное явление метеоров, или «падающих звезд». Они полностью сгорают, не достигая поверхности Земли. Однако более мелкие продукты дезинтеграции метеорных тел достигают поверхности Земли. Тела размером несколько сантиметров и более не успевают полностью сгореть в атмосфере и выпадают на поверхность Земли в виде метеоритов. Вместе с ними выпадают и мелкие частицы — продукты их дезинтеграции. Эти частицы, а также продукты дезинтеграции метеорных тел часто называют микрометеоритами.

В отличие от метеорных частиц более мелкие частицы космической пыли размером порядка нескольких десятков микрон и меньше при торможении в атмосфере не успевают нагреться до температуры плавления и, спускаясь под действием собственной тяжести, в конце концов, достигают поверхности Земли практически в неизменном виде. Таким образом, мы сталкиваемся с тремя видами космического вещества, выпадающего на Землю, это: метеориты — крупные тела, которые не полностью сгорают при прохождении через атмосферу¹; микрометеориты — мельчайшие частицы, образующиеся при горении метеорных тел и метеоритов в атмосфере, и *собственно космическая пыль* — частицы, которые в силу малой массы не расплавляются при прохождении через атмосферу и в неизменном виде достигают поверхности Земли. С позиций астробиологии именно эта составляющая космической пыли (в международной аббревиатуре она обозначается IDP — Interplanetary Dust Particle) представляет наибольший интерес, ибо, достигая поверхности Земли в неизменном виде, частицы IDP несут неискаженную информацию о составе и структуре космической пыли. Кроме того, они могут быть весьма эффективны в доставке до-биогенного органического, а возможно и биогенного, вещества на Землю. В отличие от них микрометеориты подвергаются изменениям при пролете через атмосферу и органическое вещество, не говоря уже о живых микроорганизмах, в них не сохраняется.

В отношении космической пыли, выпадающей на Землю, существует значительная терминологическая неопределенность. Наряду с термином метеорная пыль широко используется термин микрометеориты. Причем разные авторы вкладывают в него различные значения.

В. Г. Фесенков вслед за Ф. Уипплом называл микрометеоритами те частицы межпланетной пыли, которые в силу малой массы практически не нагреваются при прохождении через атмосферу и достигают поверхности Земли в неизменном виде [12]. Впоследствии Е. Л. Кринов в согласии с П. Л. Дравертом предложил подразделять внеземную пыль, поступающую на Землю, на метеорную, метеоритную и космическую. Метеорная пыль представляет собой продукт разрушения в атмосфере метеорных тел и состоит из сфероидальных частиц поперечником от нескольких микрон до

¹ Наиболее крупные из них — ядра комет и астероиды — выпадают сравнительно редко и являются источником кометно-астероидной опасности.

десятих долей миллиметра. Частицы метеорной пыли представляют собой продукт переплавления и окисления вещества метеорных тел и, следовательно, изменяют свой состав и микроструктуру по сравнению с метеорными телами. Метеоритная пыль представляет собой продукт дробления метеоритов на мельчайшие остроугольные и/или плоские частицы. Они сохраняют состав и микроструктуру, свойственную метеоритам. Космическая пыль представляет собой мельчайшие частицы, которые вторгаются в земную атмосферу из межпланетного пространства и вследствие своих малых масс достигают земной поверхности практически в неизменном виде [13]. Космическая пыль, по Кринову, соответствует IDP.

В работе Дженджа с соавторами [14] предложено выделять собственно межпланетную пыль с размерами менее 30 мкм и микрометеориты с размерами более 50 мкм. Следует, однако, иметь в виду, что граница 50 мкм условна. С одной стороны, Грачев и др. обнаружили в разрезе Гамс на границе мела и палеогена оплавленные частицы (микрометеориты) размером от 5 до 20 мкм [15], с другой — среди частиц размером более 50 мкм могут быть не только продукты дезинтеграции метеорных тел, но и космические частицы очень малой плотности, достигающие поверхности Земли без разрушения. Согласно Д. Е. Браунли, предельный размер подобных частиц 100 мкм. Частицы размерами от 0,1 до 1 мм он называет *мини-метеоритами*. Более крупные частицы становятся метеорами [16].

В рамках данной программы представляется целесообразным разработать и придерживаться единой терминологии.

Метеороиды — твердые тела, движущиеся в межпланетном пространстве, по размеру промежуточные между астероидами и космической пылью. Размеры — от долей миллиметра до нескольких десятков метров.

Метеорные тела — метеороиды, сгорающие в земной атмосфере и порождающие явление метеоров. Размеры — от долей миллиметра до 10 мм.

Метеориты — метеороиды, не сгоревшие в земной атмосфере и упавшие на поверхность Земли. Размер — более нескольких сантиметров. Метеоритами называют и астероиды, упавшие на поверхность Земли.

Микрометеориты — продукты дезинтеграции метеороидов (метеорных тел и метеоритов) при прохождении через земную атмосферу. Размеры — несколько десятков микрон (в среднем). При более детальном рассмотрении среди микрометеоритов следует различать метеорную и метеоритную пыль (по Кринову).

Космическая пыль (Cosmic dust) — частицы твердого вещества в космическом пространстве размером от долей микрона до нескольких микрон. Делится на межзвездную (размеры от тысячных до десятых долей микрона) и межпланетную (размеры порядка нескольких микрон, может быть, до десятков микрон и больше).

Космическая пыль на Земле подразделяется на микрометеориты — продукты дезинтеграции метеороидов и собственно межпланетную пыль — IDP — Interplanetary Dust Particle. Большой интерес представляет обнаружение на Земле частиц межзвездной пыли — Interstellar Dust Particle (ISDP).

Список литературы

1. *Иванова Г. М., Львов В. Ю., Васильев Н. В., Антонов И. В.* Выпадение космического вещества на поверхность Земли. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1975. 120 с.
2. *Murray J.* On the Distribution of Volcanic Debris over the Floor of Ocean // *Proc. Roy. Soc.* 1876. V. 9. P. 247–261.
3. *Murray J., Renard A. F.* Report on Deep-Sea Deposits Based on the Specimens Collected during the Voyage of H. M. S. Challenger in the Years 1872 to 1876. V. 3. Edinburg, 1891.
4. *Вернадский В. И.* Об изучении космической пыли // *Мироведение.* 1932. № 5. С. 32–41.
5. *Вернадский В. И.* О необходимости организованной научной работы по космической пыли // *Проблемы Арктики.* 1941. № 5. С. 55–64.
6. *Cassidy W.* Cosmic Dust // *Science.* 1964. V. 144. P. 1475–1477.
7. *Дивари Н. Б.* О сборе космической пыли на леднике Туюк-Су // *Метеоритика.* 1948. Вып. IV. С. 120–122.
8. *Виленский В. Д.* Сферические микрочастицы в ледниковом покрове Антарктиды // *Метеоритика.* 1972. Вып. 31. С. 57–61.
9. *Флоренский К. П.* Предварительные результаты тунгусской метеоритной комплексной экспедиции 1961 г. // *Метеоритика.* 1963. Вып. XXIII. С. 3–29.
10. Труды Международной конференции «100 лет Тунгусскому феномену», Москва, 26–28 июня 2008 г.
11. Космическая пыль на Земле // *Материалы рабочего совещания «Космическая (метеорная) пыль на поверхности Земли» (28–30 августа 2009 г., Миасс), Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2010. 192 с.*
12. *Фесенков В. Г.* К вопросу о микрометеоритах // *Метеоритика.* 1955. Вып. XII. С. 3–13.
13. *Кринов Е. Л.* Основы метеоритики / Под ред. В. Г. Фесенкова. М., 1955. С. 125–126.
14. *Genge M. J., Crady M. M., Hutchinson R.* The Texture and Composition of Fine-Grained Antarctic Micrometeorites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1997. V. 61. P. 5149–5162.
15. *Грачев А. Ф., Корчагин О. А., Цельмович В. А., Коллманн Х. А.* Космическая пыль и микрометеориты в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и химический состав // *Физика Земли.* 2008. № 7. С. 42–57.
16. *Браунли Д. Е.* Межпланетная пыль — ее физическая природа и вход в атмосферы планет земной группы. Кометы и происхождение жизни. М.: Мир, 1984. С. 69–77.

2. НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА ЗЕМЛЕ

*С. А. Булат*¹, *Л. М. Гиндилис*², *В. А. Цельмович*³

¹ *Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ)*

² *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

³ *Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН*

1. Сбор образцов КП в различных природных планшетах (снег и ледники горных вершин, снег и ледники Арктики и Антарктики, мох сфагнум, толща земных пород, донные отложения, верхняя атмосфера, околоземное и межпланетное пространство).

2. Выделение (обогащение) космической составляющей из собранных образцов пыли.

3. Комплексное исследование космической составляющей пыли:

- исследование минералогического, химического и элементного состава КП;
- исследование изотопного состава элементов, референтных для КП;
- поиск биомаркеров: биофоссилий, органических веществ, метаболитов, нуклеиновых кислот, жизнеспособных клеток в КП;
- оценка общего количества КП, выпадающей на поверхность Земли;
- пространственное распределение КП по поверхности Земли, исследование временных вариаций, изучение вариаций состава КП в геологической истории Земли;
- сравнительный анализ ископаемой КП и межпланетной пыли, собранной космическими аппаратами;
- влияние КП на палеоклимат Земли;
- влияние КП на плодородие почв и биологические объекты.

3. АСТРОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КП

Н. Г. Бочкарев¹, Н. В. Вошинников², Л. М. Гиндилис¹

¹ *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

² *Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)*

К астрономическим аспектам можно отнести исследование КП за пределами Земли путем астрономических наблюдений и с помощью космических аппаратов при полете к планетам, астероидам и кометам.

Космическая пыль наблюдается не только в межпланетном и межзвездном пространстве, но и в других галактиках и межгалактической среде (внегалактическая пыль), а также в очень удаленных объектах (космологическая пыль).

Астрономические методы дают сведения о характеристиках космической пыли, способствуя изучению общего ослабления звездного света (экстинкции), которое складывается из рассеяния и истинного поглощения. Поглощенное излучение трансформируется в тепловую энергию и переизлучается в более длинноволновой области спектра. Исследования рассеянного излучения дают сведения о размерах частиц и их распределении по размерам. Измерения поляризации рассеянного света позволяют получить данные о форме частиц и их ориентации в пространстве. Спектры излучения и рассеяния дают сведения о химическом составе частиц. А тепловое излучение частиц в ИК-области спектра дает сведения об их температуре.

Частицы космической пыли, в основном, состоят из углеродистых веществ (аморфный углерод и графит) и магнево-железистых силикатов (оливины, пироксены). Они конденсируются и растут в атмосферах звезд поздних спектральных классов, а затем выбрасываются в межзвездную среду давлением излучения. В межзвездных облаках, особенно в плотных молекулярных облаках, которые являются областями звездообразования, тугоплавкие частицы продолжают расти в результате аккреции летучих веществ из газа и столкновений друг с другом (коагуляция). Это ведет к образованию пористых агрегатных частиц. Часть из них разрушается под действием ударных волн и испарения в процессе звездообразования. Оставшаяся пыль продолжает эволюционировать вблизи образующейся звезды и играет существенную роль в формировании планетных систем (см. Приложение 1. Космогонические аспекты исследования космической пыли).

Астрономические наблюдения дают базовые сведения о космической пыли, включая ее компоненты, выпадающие на Землю. При этом важную роль играют лабораторные эксперименты, в которых определяются оптические постоянные и другие характеристики частиц, аналогичных космическим пылинкам, и моделируются процессы образования и роста пылинок в атмосферах звезд и протопланетных дисках, а также образования молекул в условиях, похожих на существующие в межзвездных облаках.

Исследование космической пыли астрономическими методами развивается широким фронтом, и в настоящее время, в рамках данной программы, не требует специальной координации.

Особняком стоит лунная пыль на поверхности Луны и в примыкающем к ней пространстве (пылевая оболочка вокруг Луны). Исследование ее ведется с помощью космических лунных миссий.

К астрономическим аспектам можно отнести и предложение *В. В. Бусарева* использовать спектрофотометрию в отраженном свете для определения минералогического и химического состава твердых небесных тел, включая КП (см. п. 11.1). Представляется, что этот метод может использоваться для исследования образцов, полученных в различных природных планшетах (см. п. 2.1).

4. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КП

4.1. Исследование ископаемой пыли

В. А. Цельмович

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН

Ископаемая пыль, обнаруживаемая в толще земных пород, представляет собой твердые частицы микронного размера — от субмикрон до десятков микрон. Природа этих частиц различна, часть связана с земными процессами, включая вулканическую пыль, часть имеет космическое происхождение (космическая пыль). Пылевая компонента играет важную роль при формировании планет. Органические частицы вместе с газом оседают в протопланетном диске, где, согласно В. Н. Снытникову (см. Приложение 1), из-за гравитационной неустойчивости формируются сгустки, содержащие в основном органические соединения; здесь возникают благоприятные условия для астрокатализа, образуется мир РНК, который является предшественником жизни. Побочным продуктом этих процессов и их индикатором могут быть нано- и микрочастицы самородных металлов. Изучение влияния космического вещества, поступающего на Землю, на геологические процессы является одной из актуальных задач в науках о Земле. Количество космической пыли в породах определяется скоростью поступления космического вещества (есть данные, что она неравномерна) и скоростью осадконакопления: чем меньше скорость осадконакопления, тем выше концентрация космогенной компоненты. Выделение космогенной компоненты в породах — важнейшая задача при исследовании ископаемой КП.

Одним из эффективных методов изучения ископаемой КП является исследование частиц самородных металлов. Самородные металлы (СМ) представляют собой химически простые тела, которые находятся в механической смеси с другими минералами. Источником их являются метеориты, космическая пыль, магматические тела, вулканические пеплы. Частицы СМ, образующиеся при различных процессах, отличаются по составу и морфологии и могут служить индикаторами этих процессов. Исследования самородных металлов в осадочных породах на границе мела и палеогена (Гамс, Австрия; Стевентс Клинт, Дания), а также из кратера Чиксулуб (Мексика) и из 40 метеоритов [1–18] позволили создать набор индикаторов (по составу и микроструктуре), дающих возможность диагностировать геологические и космические процессы, приводящие к появлению СМ. К числу таких индикаторов относится «фоновый индикатор», выражающийся в наличии магнетитовых «космических шариков», обязательно в сочетании с частицами самородных металлов и интерметаллидов, а также наличии других минералов, характерных для космического вещества: алмаза, муассанита, корунда, шрейберзита и др. Разработанные индикаторы могут также использоваться при поиске погребенных астроблем. Использование таких индикаторов носит вероятностный характер в силу особенностей объекта, однако несомненно то, что в процессе работы набор таких инди-

каторов будет пополняться как при использовании микрозондовых данных, так и при использовании в сочетании с ним изотопных методов.

Особенностью науки конца XX – начала XXI века стало активное изучение нанометровых структур. Нанодисперсное состояние минерального вещества характерно для верхних частей литосферы, гидросферы, космического пространства [19]. Объектом минералогических исследований являются тонкодисперсные продукты седиментогенеза, биоминералы, космическая и атмосферная пыль, вещество метеоритов, вулканическое вещество, продукты техногенеза. Среди естественных наук одним из лидеров проникновения в мир наноструктур стала минералогия. В кристаллах минералов, горных породах, слоистых толщах осадков фиксируются и миллиарды лет сохраняются признаки, характеризующие не только эволюцию самой Земли, но и ее взаимодействие с космосом [20]. Активно изучается магнитная микроструктура наноструктурированных ферромагнетиков из-за их замечательных свойств и перспектив возможных приложений [21]. Благодаря массовому использованию микрозондов с энергодисперсионными спектрометрами самородные металлы были найдены в самых различных объектах: в космическом веществе [1, 2, 4, 6–8, 11, 12, 14–16], в пеплах [22, 23], в нефтегазоносных коллекторах [24], в офиолитах, в вулканических породах, в лунном реголите [25], в техногенной пыли. Они являются хорошими маркерами различных космических, вулканических и техногенных событий, поскольку частицы различного происхождения (как было отмечено выше) имеют свои особенности по составу и морфологии [12, 14, 15].

Однако для того, чтобы повысить надежность таких выводов, требуется продолжение исследований на новых объектах, так как неизбежно возникает ряд непростых вопросов, прежде всего по идентификации космического вещества в осадочных породах. К таким объектам относятся осадки из озер с большой скоростью осадконакопления и океанские осадки с малой скоростью осадконакопления. Их сравнительное изучение позволит более четко выделить космическую компоненту, которой будет существенно меньше в озерных осадках на фоне прочих компонент. В связи с этим необходимо изучение с помощью комплекса физико-химических методов анализа (электронно-зондового микроанализатора, сканирующего электронного микроскопа, термомагнитного анализа, рентгенофазового анализа и др.) морфологии и состава магнитных микро- и наночастиц и самородных металлов из озер с высокой скоростью осадконакопления (Байкал, Дархад, Балхаш, Яровое и др.) и из Атлантики (низкая скорость осадконакопления). Вклад космического материала в океанические осадочные породы подозревался давно. Многие морские геологи и геохимики до сего времени связывают некоторые стороны рудогенеза (например, накопление таких компонентов, как железо, никель, кобальт) со значительными поставками на дно океана космической пыли [26].

Для определения содержания космической пыли в осадке можно использовать следующие признаки: 1) различие космической и земной распространенности некоторых элементов, например Ni, Fe, Co, Os, Ir и др.; 2) отличие физических свойств космических и земных пылинок. В част-

ности, признаками «космичности» считаются сферичность частиц, темная окраска поверхности, намагниченность, характерные размеры [27–29]. На этой основе нами была разработана методика выделения магнитных микро- и наноминералов [11], уже опробованная на ряде объектов, в которых было обнаружено магнитное космическое вещество [1, 3, 6, 16]. Земное и космическое магнитное вещество, микрометеориты изучаются также в антарктическом льде [30]. Большое внимание уделено изучению осадконакопления плюмового вещества [31]. Изучению импактных сферул посвящены работы «Fe-rich and K-rich mafic spherules from slumped and channelized Chicxulub ejecta deposits in the northern La Sierrita area, NE Mexico» [32] и «Spherules of NiO meteorite shower found at rice-field in Japan» [33]. Состав тектитовых сферул, выделенных на границе мела и палеогена подробно изучен [34]. Изучены характеристики и происхождение сферул из базальтовой провинции западной Гренландии [35]. Найдены сферулы из почти чистого железа и никеля. Железоникелевые сульфиды и наночастицы пирита были найдены в межпланетной пыли [36].

Методика изучения магнитных частиц [11, 15] позволяет изучать состав и морфологию микро- и наночастиц с большой степенью детальности и достоверности для особо мелких частиц, уверенно выделяя и фиксируя для анализа отдельные магнитные частицы не только микронного размера, но и наноразмерные. На этой основе можно проводить изучение условий накопления, вклад в магнитный сигнал магнитных частиц различного происхождения: космического, терригенного, биогенного, техногенного. С этой целью целесообразно провести изучение самородных металлов, минералов и металлических микро- и наночастиц из осадков, из астроблем — Карской (Восточная Сибирь) и Цэнхэр (Монголия), а также образцов снежного покрова Центральной Восточной Антарктиды (станция Восток) как идеально-го природного планшета для сбора космической пыли, и других объектов.

Большое значение имеет изучение остатков магнитных бактерий как индикаторов климатических процессов, которые, как показывает опыт, извлекаются попутно при исследовании магнитных частиц. Среди биогенных магнитных минералов важную часть составляют магнетит и грейгит, производимые магнитотактическими бактериями, обитающими в водной среде в условиях наличия достаточно резкой окислительно-восстановительной границы [37]. В процессе эволюции такие кристаллы приобрели оптимальные параметры (размеры, форму, состав), которые позволяют их узнавать в осадке. Это — стехиометрия кристаллов, их специфичная форма, наличие множества совершенно идентичных кристаллов, в том числе и в цепочках [37]. Обнаружив в породе подобные кристаллы, можно с большой долей уверенности полагать их биогенное происхождение, а по соотношению кислорода и серы делать выводы о климате. Хотя обычно для таких исследований применяют просвечивающий микроскоп высокого разрешения, опыт изучения остатков магнитных бактерий из озера Хубсугул при использовании сканирующего микроскопа с меньшей разрешающей способностью показал возможность изучения агломератов таких остатков магнитных бактерий с характерным размером 100–200 нм.

При изучении СМ и магнитных минералов из астроблем особое внимание следует уделять процессам, происходящим при падении астероидов и приводящим к изменению состава и структуры минералов мишени и ударника — к появлению новых специфических структур. В этом плане существенное значение имеет использование уже апробированной методики выделения магнитных наноминералов из осадков, позволяющей выделять и анализировать отдельные магнитные микро- и наноминералы, СМ.

Список литературы

1. *Grachev A.F., Korchagin O.A., Kollmann H.A., Pechersky D.M., Tselmovich V.A.* A New Look at the Nature of the Transitional Layer at the K/T Boundary near Gams, Eastern Alps, Austria, and the Problem of the Mass Extinction of the Biota // *Rus. J. Earth Sci.* 2005. V. 7, No. 6. P. 1–45.
2. *Pechersky D.M., Grachev A.F., Nourgaliev D.K., Tsel'movich V.A., Sharonova Z.V.* Magnetolithologic and Magnetomineralogical Characteristics of Deposits at the Mesozoic/Cenozoic Boundary: Gams Section (Austria) // *Rus. J. Earth Sci.* 2006. V. 8. ES3001; doi:10.2205/2006ES000204.
3. *Корчагин О.А., Цельмович В.А., Дубинина С.В.* Метеоритные микросфера и частицы из глубоководных известняков верхнего кембрия (Батырбай, Южный Казахстан) // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. Минералогия, петрография, литология.* 2007. №3. С. 17–22.
4. *Grachev A.F., Tselmovich V.A., Korchagin O.A., Kollmann H.A.* Two Spinel Populations from the Cretaceous-Paleogene (K/T) Boundary Clay Layer in the Gams Stratigraphic Sequence, Eastern Alps // *Rus. J. Earth. Sci.* 2007. V. 9. ES2002; doi:10.2205/2007ES000297.
5. *Korchagin O.A., Dubinina S.V., Tselmovich V.A., Pospelov I.I.* Possible Impact Event in the Late Cambrian // *Acta Palaentologica Sinica.* 2007. V. 46. Suppl. P. 227–231.
6. *Грачев А.Ф., Корчагин О.А., Цельмович В.А., Коллманн Х.А.* Космическая пыль и метеориты в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и химический состав // *Физика Земли.* 2008. №7. С. 42–57.
7. *Tselmovich V.A., Grachev A.F., Korchagin O.A.* The First Finds of Silica Glass from the Cretaceous-Paleogene (K/T) Boundary Clay Layer in the Gams Stratigraphic Sequence, Eastern Alps // *Intern. Conf. «100 Years Since Tunguska Phenomenon: Past, Present and Future»,* June 26–28, Moscow. Moscow, 2008. P. 221–222.
8. *Грачев А.Ф., Печерский Д.М., Борисовский С.Е., Цельмович В.А.* Магнитные минералы в осадках на границе мела и палеогена (разрез Гамс, Восточные Альпы) // *Физика Земли.* 2008. №10. С. 1–16.
9. *Печерский Д.М., Грачев А.Ф., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А.* Магнитоминералогическая характеристика переходного слоя на границе мела и палеогена (разрез Гамс, Восточные Альпы, Австрия) // *Геофизические исследования.* 2008. Т. 9, №4. С. 29–39.
10. *Корчагин О.А., Цельмович В.А., Поспелов И.И., Цяньтао Бянь.* Космические магнетитовые микросферы и металлические частицы вблизи границы

Пермь–Триас в точке глобального стратотипа границы (слой 27, Мэйшань, Китай) // Докл. РАН. 2010. Т. 432, № 2. С. 1–7.

11. *Цельмович В. А.* Новые и перспективные возможности микрозондового анализа в геофизической обсерватории «Борок» // Вестн. ОНЗ РАН. 2010. Т. 2. NZ6030; doi:10.2205/2010NZ000048; <http://onznnews.wdcb.ru/publications/v02/2010NZ000048.pdf>
12. *Цельмович В. А., Корчагин О. А., Некрасов А. Н., Старченко С. В.* Диагностика происхождения магнитных микросфер // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Материалы международного семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород (20–24 сентября 2010 г., Петродворец). Санкт-Петербург. С. 165–171.
13. *Поспелова Г. А., Голованова Л. В., Дороничев В. Б., Цельмович В. А.* Магнитные и минералогические характеристики пород палеолитической стоянки в Мезмайской пещере (Северный Кавказ) // Физика Земли. 2011. № 7. С. 86–96. doi: 10.1134/S0002333711070088 .
14. *Корчагин О. А., Цельмович В. А.* Космические частицы (микрометеориты) и наносферы из пограничного слоя глины между мелом и палеогеном (К/Т) разреза Стивенс Клинт, Дания // Докл. РАН, 2011. Т. 437, № 4. С. 520–525.
15. *Цельмович В. А.* О метеоритном происхождении самородных металлов в осадочных породах // Диагностика вулканогенных продуктов в осадочных толщах: Материалы Российского совещания с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2012. С. 190–193.
16. *Цельмович В. А.* Могут ли частицы самородных металлов быть индикатором вещества Тунгусского метеорита. Материалы Российского совещания с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2012. С. 193–196.
17. *Печерский Д. М., Марков Г. П., Цельмович В. А., Шаронова З. В.* Внеземные магнитные минералы // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 103–120.
18. *Печерский Д. М., Нургалиев Д. К., Шаронова З. В., Фомин В. А., Гильманова Д. М.* Космическое железо в осадках мела–даниа // Физика Земли. 2011. № 5. С. 12–34.
19. *Юшкин Н. П., Асхабов А. М.* Мир наноминералогии // Вестник Института геологии Коми Научного центра Уральского отделения РАН. 2007. № 12. С. 2–5.
20. *Жабин А. Г.* Космические процессы и минералообразование // Земля и Вселенная. 1982. № 1. С. 59–61.
21. *Комогорцев С. В., Исхаков Р. С., Балаев А. Д., Кудашов А. Г., Окотруб А. В., Смирнов С. И.* Свойства ферромагнитных наночастиц Fe₃C, капсулированных в углеродных нанотрубках // Физика твердого тела. 2007. Т. 49(4). С. 700–703.
22. *Сандимирова Е. И.* Магнитные сферулы из кайнозойских отложений Курильских островов и Южной Камчатки // Материалы докладов III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 3. Улан-Удэ, 2006. С. 766–771.
23. *Карпов Г. А., Мохов А. В., Серегина К. А.* Микрочастицы рудных минералов в пеплах Карымского вулкана // Материалы. конф. ко дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2005. С. 30–37.
24. *Лукин А. Е., Савиных Ю., Донцов В.* О самородных металлах в нефтегазоносных кристаллических породах месторождения Белый Тигр (Вьетнам) // Геолог Украины. 2007. № 2. С. 30–42.

25. *Мохов А. В., Карташов П. М., Богатииков О. А.* Луна под микроскопом. Новые данные по минералогии Луны. М.: Наука, 2007. 128 с.
26. *Лисицын А. П.* Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 435 с.
27. *Mathur S. C., Mathur S. K., Loyal R. S.* First Report of Microvertebrate Assemblage from Cretaceous Fatehgarh Formation // Geological Society of India. 2006. V. 67. P. 6.
28. *Mathur S. C., Gaur S. D., Loyal R. S., Tripathi A., Sisodia M. S.* Spherules in the Fatehgarh Formation (Cretaceous) of Barmer Basin, India // Gondwana Research. 2005. V. 8, No. 4. P. 579–584.
29. *Mathur S. C., Gour S. D., Loyal R. S., Tripathi A., Tripathi R. P., Ajay Gupta.* First Report on Magnetic Spherules Recovered from Maastrichtian Bone Bed, in the Sedimentary Sequence of Fatehgarh Formation, Barmer Basin, India // Current Science. 2005. V. 89, No. 7. P. 1259–1268.
30. *Gounelle M. et al.* Small Antarctic micrometeorites: A Mineralogical and in situ Oxygen Isotope Study // Meteoritics & Planetary Science. 2005. T. 40, № 6. C. 917–932.
31. *Bonadonna C., Houghton B. F.* Total Grain-Size Distribution and Volume of Tephra-Fall Deposits // Bulletin of Volcanology. 2005. V. 67, Iss. 5. P. 441–456.
32. *Schulte P., Stinnesbeck W., Stiiben D. et al.* Fe-Rich and K-Rich Mafic Spherules from Slumped and Channelized Chicxulub Ejecta Deposits in the Northern La Sierrita Area, NE Mexico // Intern. J. Earth Sci. 2003. V. 92. P. 114–142.
33. *Miura Y., Uedo Y.* Spherules of Nio Meteorite Shower Found at Rice-Field in Japan. Institute of Earth Sciences, Faculty of Science // Meteoritics & Planetary Science. V. 36, Suppl. P. A137.
34. *Harting M., Rickers K., Kramar U., Simon R., Staub S., Schulte P.* Multielement Geochemical Investigations by SRXRF Microprobe Studies on Tectite Material: Evidence from the NE-Mexican Cretaceous // Tertiary Record AGU 2002 Fall Meeting, San Francisco, 2002.
35. *Robin E., Swinburne N. H. M., Froget L., Rocchia R., Gayraud J.* Characteristics and Origin of the Glass Spherules from the Paleocene Flood Basalt Province of Western Greenland // Geochim. Cosmochim. ACTA. 1996. V. 60. P. 815–830.
36. *Dai Z. R., Bradley J. P.* // Geochim. Cosmochim. Acta. 2001. V. 65. P. 3601.
37. *Kirschvink J. L., Kopp R. E.* Palaeoproterozoic Ice Houses and the Evolution of Oxygen-Mediating Enzymes: The Case for a Late Origin of Photosystem II. // Phil. Trans. Roy. Soc. B. 2008. V. 363. P. 2755–2765; doi:10.1098/rstb.2008.0024.

4.2. Исследование раннедокембрийских кор выветривания

4.2.1. Идентификация раннедокембрийских кор химического выветривания

Ю. Д. Пушкарев, Н. А. Алфимова

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
Санкт-Петербург*

Проблема идентификации вещества раннедокембрийских (2700–1900 млн лет) кор химического выветривания весьма актуальна. Ее сложность состоит в том, что породы, сходные по составу с таким

веществом, возникают в зонах кислотного выщелачивания. В итоге распознать что-то похожее на кору химического выветривания можно, но обосновать реальную природу этого всегда трудно. В поисках решающих аргументов родилась идея о том, что в результате длительного экспонирования вещества коры выветривания на дневной поверхности оно должно быть мечено компонентом космической пыли.

Цель работы — идентифицировать раннедокембрийскую кору химического выветривания в восточной части Балтийского щита посредством выявления в ней компонента КП.

Представляется, что именно на химические коры выветривания приходится максимально длительная экспозиция выветриваемых пород на дневной поверхности. Соответственно в этих породах должно концентрироваться наибольшее количество космической пыли. Ее идентификация возможна на основе нескольких признаков космического вещества.

Химическими индикаторами космической пыли послужат те элементы, доля которых в протопланетном веществе по сравнению с земным, и в первую очередь по сравнению с веществом земной коры, существенно повышена. Прежде всего, это элементы платиновой группы, которые почти на 99 % были удалены в ядро Земли на ранней стадии ее эволюции.

Изотопными индикаторами космической пыли должны служить те химические элементы, которые в этом веществе в отличие от земных пород сохраняли протопланетные изотопные характеристики на протяжении всей геологической истории в течение 4,5 млрд лет. Прежде всего, это свинец, поскольку его изотопный состав в КП обусловлен существенно более медленным накоплением радиогенных изотопов ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb вследствие десятикратно пониженного отношения U/Pb и Th/Pb по сравнению с таковым в земных породах, как коровых, так и мантийных. Соответственно выявление повышенной доли нерадиогенного изотопа — ^{204}Pb в исследуемом веществе будет служить надежным показателем присутствия в нем компонента космической пыли.

Другим индикатором космической пыли мог бы служить изотопный состав гелия, и в частности повышенная доля изотопа ^3He . Однако в докембрийских корах выветривания в отличие от элементов платиновой группы (ЭПГ) эта особенность может быть полностью утрачена за счет метаморфических преобразований, при которых газообразные элементы, и в первую очередь наиболее подвижный гелий, полностью теряются. После такого процесса гелий накопится снова, однако это будет только радиогенный изотоп ^4He .

Методически работа сводится к двум этапам:

1) определение концентрации иридия в магнитной и немагнитной фракциях породы, отождествляемой с докембрийской корой химического выветривания;

2) определение в этих двух фракциях изотопного состава свинца.

В зависимости от полученных результатов возможно определение изотопного состава гелия в наиболее высокотемпературной части газовой

составляющей, поскольку именно в этой ее фракции обычно сохраняется реликтовый компонент.

После выявления геохимических и изотопных признаков присутствия космической пыли будет целесообразно привлечь возможности методов В. А. Цельмовича для непосредственной идентификации частиц КП.

Ожидаемые результаты — выявление изотопно-геохимических признаков присутствия космической пыли и идентификация вещества докембрийской коры выветривания для ее дальнейшего изучения и использования в целях хемостратиграфии.

4.2.2. Роль биогенного фактора в формировании раннедокембрийских кор выветривания

М. М. Астафьева¹, А. Ю. Розанов²

¹ *Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка РАН (ПИН РАН), Москва*

² *Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна*

Участие микроорганизмов в преобразованиях горных пород — это один из самых горячих вопросов современной геологии. Роль бактерий при образовании минералов и пород неоднократно обсуждалась в современной литературе [1–4], и к настоящему времени показано, что различные бактерии катализируют кристаллизацию и осаждение аутигенных минералов [5, 6]. Минерализованные бактериальные тела встречаются среди карбонатных и глинистых осадков, бокситов, осадочных железомарганцевых руд и других осадочных пород. Описано уже более 100 минералов, образование которых может быть связано с деятельностью бактерий [3, 6, 7–11].

Один из наиболее широко проявленных процессов начальной стадии литогенеза — это выветривание. Продукты выветривания — осадочные породы — фиксируются уже для самых ранних стадий геологического развития Земли. Как в фанерозое, так и в докембрии коры выветривания являются единственными достоверными свидетельствами существования континентальных обстановок и зачастую становятся единственными источниками информации об условиях экзогенных процессов, и следовательно, условиях, в которых происходило развитие биосферы.

Наиболее древние организмы были обнаружены в породах с возрастом 3,8 млрд лет [12]. Это означает, что уже в архее возможно было формирование биоминералов, однако роль биотической составляющей для древнейшего аутигенного минералообразования сейчас не определена. Образование глинистых минералов группы иллита могло происходить не только в ходе абиотической кристаллизации, но и при участии бактерий. Современные исследования [13] свидетельствуют о том, что конечный продукт выветривания — глинистые минералы — будь они биотического или абиотического происхождения, практически не различаются по структуре и химическому составу. Таким образом, отсутствуют геохимические

критерии разделения глинистых пород биотического и абиотического генезиса.

Предположения о существовании жизни на суше раннедокембрийских кратонов прежде выдвигались только на основании изучения элементных и изотопных отношений С, Н, N и Р в веществе. Таким образом, утверждается факт наличия микробного мата на поверхности почвы уже 2,7–2,6 млрд лет назад [14].

В результате электронно-микроскопических исследований образцов из описанных кор выветривания был обнаружен комплекс разнообразных остатков fossilizированных микроорганизмов. Среди этого комплекса выделяются нитчатые (филаментные), коккоидные (диаметр до 5 мкм), более крупные шаровидные формы (диаметр превышает 10 мкм), fossilizированные биопленки и т. д. Довольно часто породы состоят практически полностью из разрушенных кокков, гантелевидных форм и обрывков нитей.

Химический состав биоморфных микроструктур, входящих в описанный комплекс, во всех случаях идентичен составу вмещающих пород и представлен главными породообразующими окислами кремния, алюминия, железа, калия и магния. Это служит косвенным подтверждением того, что микробиологический комплекс одновозрастен с вмещающими породами. Вероятнее всего, зафиксированные в породах микроорганизмы выполняли роль катализатора — при их участии происходило разложение минералов, слагающих породы, и преобразование их в глинистые минералы. И, возможно, благодаря взаимодействию специфического видового состава микроорганизмов и условий гипергенных преобразований и были сформированы уникальные коры выветривания раннего докембрия.

Установлено, что уже в раннем докембрии существовало морфологическое разнообразие бактериальных форм жизни, находки которых в объектах гипергенного происхождения свидетельствуют в пользу экзогенетической природы самих объектов.

Таким образом, в раннем докембрии микроорганизмы, бактерии, возможно, цианобактерии и даже, возможно, эвкариоты сопровождали и способствовали образованию кор выветривания. Значит можно говорить о заселенности суши микробами уже в это время и о существовании одного ряда от кор выветривания (примитивных почв) к настоящим почвам.

Ранее было сделано предположение о существовании единого ряда кор выветривания: от кор выветривания (примитивных почв) к настоящим почвам. Можно сказать, что роль бактерий в их образовании практически соответствовала роли сосудистых растений в современных гипергенных процессах, поскольку роль органических кислот и CO_2 , образующихся при разложении органического вещества, довольно значительна.

Выявление ископаемых микроорганизмов, их исследование и изучение вмещающих отложений будет проводиться с использованием сканирующих электронных микроскопов, рентгеновского микротомографа и сопровождаться качественными и количественными исследованиями состава пород

с помощью микроанализаторов. Уже имеется большой опыт по специальной предварительной обработке образцов для работы на электронном сканирующем микроскопе. Для изучения пород субстрата, кор выветривания и синхронных осадков будут привлекаться изотопно-геохимические и минералого-петрографические исследования, проводимые совместно с Институтом геологии и геохронологии РАН.

Список литературы

1. Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms / Eds.: J. L. Kirshvink, D. S. Jones, B. J. MacFadden. N.Y.–L.: Plenum 2, 1985.
2. Lowenstam H. A., Weiner S. On Biomineralization. Oxford: Oxford Univ. Press. 1989. 324 p.
3. Tazaki K. Biomineralization of Layer Silicates and Hydrated Fe/Mn Oxides in Microbial Mats: An Electron Microscopical Study // Clays and Clay Minerals. 1997. V. 45(2). P. 203–212.
4. Розанов А. Ю., Заварзин Г. А. Бактериальная палеонтология // Вестник РАН. 1997. Т. 67, № 2. С. 109–113.
5. Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2002. 188 с.
6. Rozanov A. Yu. Precambrian Geobiology // Paleontol. J. 2006. V. 40. Suppl. 4. P. S434–S443.
7. Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals / Eds.: J. F. Banfield, K. H. Nealson // Rev. Mineralogy. 1997. V. 35. 448 p.
8. Fortin D., Ferris F. G., Beveridge F. G. Surface-Mediated Mineral Development by Bacteria // Reviews in Mineralogy. 1998. V. 35. Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals / Eds.: J. F. Banfield, K. H. Nealson. P. 161–180.
9. Герасименко Л. М., Жегалло Е. А., Жмур С. И. и др. Бактериальная палеонтология и исследования углистых хондритов // Палеонтол. журн. 1999. № 4. С. 103–125.
10. Astafieva M. M., Rozanov A. Yu., Vrevsky A. B., Alfimova N. A., Matrenichev V. A., Hoover R. B. Fossil Microorganisms and Formation of Early Precambrian Weathering Crusts // Proc. SPIE. 2009. V. 7441. P. 744107-1–744107-15.
11. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.
12. Schidlowski M. A 3.800-Million-Year Isotopic Record of Life from Carbon in Sedimentary Rocks // Nature. 1988. No. 333. P. 313–318.
13. Kawano M., Tomita K. Formation and Evolution of Weathering Products in Rhyolitic Pyroclastic Flow Deposit, Southern Kyushu, Japan // J. Geol. Soc. Jap. 1999. V. 105, No. 10. P. 699–710.
14. Watanabe Y., Martini J. E. J., Ohmoto H. Organic and Carbonate-Rich Soil Formation 2.6 Billion Years Ago // Nature. 2000. V. 408. P. 576–578.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ В СНЕЖНОМ И ЛЕДОВОМ ПОКРОВЕ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

5.1. Сбор образцов снега и льда в Антарктике

Е. С. Булат^{1,2}, С. А. Булат¹, Л. М. Гиндилис³

¹ *Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ)*

² *Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка РАН (ПИН РАН), Москва*

³ *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

Отбор снега производится из шурфа, отрытого вручную лопатой на удалении не менее 2 км от антарктической станции в месте, наименее подверженном загрязнению по розе ветров. Глубина и размер одного шурфа устанавливаются применительно к задаче исследований. Образцы снега откапываются послойно, для оценки временного распределения пыли (высоте слоя 20 см соответствует примерно трехлетний интервал накопления в районе станции «Восток»). Каждый слой упаковывается отдельно в специальный контейнер, маркируется и помещается в тройной полиэтиленовый пакет для предохранения от земных загрязнений при транспортировке. Маркировка контейнера включает номер слоя (сверху вниз).

При отборе снега принимаются меры защиты для предотвращения загрязнения образцов компонентами земной пыли в соответствии с методикой, применяемой по программе «Биология на базе 480 км» (отв. С. А. Булат). Откапывание снега производится в комбинезоне, лицевой маске и перчатках с помощью специально обработанной лопатки. Комбинезон и перчатки больше не используются, а лопатка помещается в тот же полиэтиленовый пакет, из которого она была взята. При следующем отборе снега используются новый комбинезон и новые перчатки, в то время как лопатка используется та же самая.

Сбор кернов снега/фирна/льда производится на удалении от станции в нескольких местах в точках, наименее подверженных загрязнению по розе ветров, с разных глубин в соответствии с заявкой заказчика для сопоставления с астрономическими и геофизическими событиями.

Отбор проб производят на ровном участке поверхности льда, очищенном от поверхностного снежного покрова, ручным кольцевым буром. Для «очистки» бура необходимо провести пробное бурение на глубину не менее трех метров. После отбора измеряют длину полученного керна льда. КERN помещают в тройной полиэтиленовый пакет или цилиндрический контейнер с винтовой крышкой, изготовленный из полимерного материала (допускается применять металлический контейнер), контейнер (пакет) с кERNом маркируют и хранят на станции при отрицательной температуре до отправки на НЭС «Академик Федоров». Перед отправкой образцы льда перегружаются в специальный ящик (ящики), в котором образцы доставляются к месту назначения.

В случае необходимости определения химического состава различных форм керн снега/фирна непосредственно на месте отбора должен быть разделен на образцы, соответствующие формам льда. Каждый образец упаковывают и маркируют отдельно.

Образцы снега и льда транспортируются при минусовой температуре на НЭС «Академик Федоров» в Санкт-Петербург, где передаются заказчику для лабораторных исследований.

5.2. Сбор образцов снега и льда в Арктике

Е. С. Булат^{1,2}, С. А. Булат¹, Л. М. Гиндилис³, А. С. Петров⁴

¹ Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ)

*² Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка РАН (ПИН РАН),
Москва*

*³ Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

*⁴ Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт (ФГБУ «ААНИИ»), Санкт-Петербург*

Отбор проб снега и льда производится на дрейфующих станциях типа «Северный полюс» и с наземных ледников на арктических островах.

Отбор снега производится на удалении от станции в месте, наименее подверженном загрязнению по розе ветров. Перед отбором проб нужно удалить 10–15 см поверхностного снега. Далее снег отбирается с помощью «специальной» лопатки (предварительно деконтамированной) из шурфа и упаковывается в специальный контейнер с крышкой из полимерного материала.

Скол многолетнего льда (как минимум двухлетнего на торосах) производится вручную с помощью «стерильного» ледоруба. Образцы льда помещаются в специальный контейнер с крышкой из полимерного материала.

При отборе проб снега и льда принимаются всесторонние меры защиты для предотвращения загрязнения образцов компонентами земной пыли в соответствии с методикой работы (см. ниже).

Контейнеры с образцами снега и льда помещают в двойной или тройной полиэтиленовый пакет, маркируют и хранят на станции при отрицательной температуре до отправки на самолете или судне. Образцы доставляют в Санкт-Петербург в морозильной камере, где передают заказчику для исследований.

Методика работы:

Сбор снега и льда с космической пылью (особые предосторожности — не загрязнить земной пылью!).

Используются два набора принадлежностей № 1 (для сбора снега) и № 2 (для сбора льда) — см. таблицу.

Упаковочный лист

№ набора с принадлежностями	Содержание	№ контейнера	Доставка
1, для сбора снега	Два набора виниловых перчаток, хирургическая маска (убрать течение из носа, держать проволокой кверху для зажатия носа), комбинезон (без бахил), лопатка	1	ААНИИ
2, для сбора льда	Два набора виниловых перчаток, хирургическая маска (убрать течение из носа, держать проволокой кверху для зажатия носа), комбинезон (без бахил), ледоруб — см. выше	2	ААНИИ

Руководство — что и как делать:

Откапывание снега и льда производить в комбинезоне, перчатках и маске с помощью специально обработанной лопатки или ледоруба.

Выбрать место для проб — отойти как можно дальше от людей/машин, и против ветра.

Поднести контейнер и пакет № 1 (№ 2) с комбинезоном и пр.

Подготовить контейнер — снять упаковочную пленку и пломбы с крышки.

Открыть пакет с № 1(№ 2).

Одеть первую пару перчаток, затем комбинезон и потом маску (вторая пара перчаток на случай необходимой замены).

Извлечь из пакета лопатку (или ледоруб).

Делать шурф лопаткой (или ледорубом) и по ходу производить сбор снега (льда) в контейнер с его легкой утрамбовкой.

Закрыть контейнер крышкой, запломбировать крышку контейнера с помощью крепежа или скотчем. Перед транспортировкой на судно обмотать контейнеры упаковочной пленкой.

По возможности документировать процесс сбора снега с помощью фотосъемки (только со стороны — наблюдателем!).

5.3. Пробоподготовка и исследование КП в снежном и ледовом покрове Антарктики и Арктики

С. А. Булат¹, В. Я. Липенков²

¹ *Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ)*

² *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ «ААНИИ»), Санкт-Петербург*

Исследования проводятся ФГБУ «ААНИИ» (В. Я. Липенков, Лаборатория изменений климата и окружающей среды) совместно с ФГБУ

«ПИЯФ» (С. А. Булат, группа/лаборатория криоастробиологии) в следующем порядке.

1. ААНИИ — проведение геохимических и стратиграфических исследований снежно-фирново-ледяной толщи и сбор инструментальных данных о скорости аккумуляции ледяных отложений с целью получения информации, необходимой для интерпретации результатов исследований образцов снега, фирна, льда, содержащих КП (определение времени отложения КП, расчет скорости выпадения КП и оценка ее пространственно-временной изменчивости в полярных областях Земли и т. д.)

2. ААНИИ совместно с ПИЯФ — выбор перспективных районов (и глубин) для сбора КП в Антарктике на основе имеющейся гляциологической и биологической информации с учетом возможного загрязнения Земной биологической компонентой (в основном, живой микробиотой или ее останками в виде ДНК).

3. ААНИИ — проведение отбора образцов в рамках научных программ Российской антарктической экспедиции.

4. Разработка и создание специализированного оборудования для осуществления предварительной пробоподготовки — плавления и концентрирования образцов снега и льда, содержащих КП, в полевых и/или лабораторных условиях.

5. ПИЯФ — разработка протокола «чистого» (от земной микробной компоненты) сбора снега и льда и предоставление деконтаминированных (от живой микробной компоненты и ее ДНК) материалов и оборудования для такого рода сбора, договоренность о доставке собранных образцов снега и льда в лабораторию, сертифицированную по классу чистоты (с рабочими местами классом не ниже 100), плавление образцов снега и льда с последующим концентрированием материала (КП) в условиях чистых помещений. Распределение полученного материала на различного рода анализы (и в архив), включая тестирование биомолекул.

6. ПИЯФ и ААНИИ — предложенное ААНИИ плавление и концентрирование образцов снега и льда, содержащих КП, в полевых и/или лабораторных условиях (не в «чистых» помещениях) приветствуется и всячески поддерживается, но требует сравнения с условиями «чистой» лаборатории. Рекомендуется провести специальное сравнение полученных в разных условиях образцов пыли на предмет содержания КП (ее доли в общей массе земной пыли) и степени загрязнения земной микробиотой и биомолекулами. Для этого запланировать проведение задублированного сбора образцов снега с его последующей обработкой в разных условиях и сравнение полученного материала на предмет общего содержания частиц пыли и их распределения по размеру, процентного содержания КП и биологического загрязнения образцов и, в целом, определения пригодности образцов для проведения комплексного (всех родов) анализа.

7. ААНИИ — палеоклиматическая интерпретация результатов исследований КП с учетом данных палеоклиматических реконструкций по ледяным и снежным кернам.

8. ААНИИ — научно-техническое сопровождение транспортировки проб из Антарктики и обеспечение их хранения при отрицательной температуре (в морозильных камерах ЛИКОС ААНИИ).

9. ААНИИ — оборудование рабочего места для коллективных пользователей в морозильной камере ЛИКОС для резки льда и фасовки снега (столлик, пила, лампа обычная, установка для просмотра и документации в поляризованном свете, весы, комплект теплой одежды, полиэтиленовые рукава разного размера, запайка, спирт — ПИЯФ).

10. ПИЯФ — проведение микробиологических и молекулярно-биологических анализов образцов пыли и прочего материала, полученных из снега и льда, и конфокальная (и другая) микроскопия отдельных частиц КП. Участие в определении общей концентрации частиц пыли и распределения частиц по размеру.

6. СБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ И ЛЕДНИКАХ ВЫСОКОГОРНЫХ РАЙОНОВ

6.1. Предложения к «Программе работ по исследованию космической пыли»

М. В. Лобанков

*Уфимский государственный нефтяной технический университет
(УГНТУ)*

Исследования образцов снега с вершины Эльбруса (5642 м) и пика Победы (7439 м) в лабораториях Института минералогии РАН (г. Миасс), выполненные в 2010 г., показали низкую концентрацию космического вещества в пробах, приготовленных после выпаривания снеговой воды массой до 5 кг. Измерения концентрации химических элементов в пробах и их идентификация выполнялись на пределе чувствительности аналитического оборудования.

Для повышения точности измерений и достоверности выводов по результатам этих измерений следует увеличить массу проб снега, добываемого с земной поверхности в местах с минимальными добавками земного вещества, хотя бы до 100 кг или несколько более. Приносить такую массу снега с высочайших вершин под силу только специальным научным экспедициям с участием опытных альпинистов высочайшего класса.

Альтернативой мог бы послужить способ добычи космической пыли в зимнее время на меньших высотах вдали от промышленных районов во время снегопадов, когда мала вероятность попадания в атмосферу пыли с земной поверхности.

Для этого необходимо разработать комплекс технических средств, включая следующие:

- обогреваемые ловушки снега с большой площадью поверхности захвата и накопления снега (до 10 м²);
- устройство сбора снеговой воды и, по возможности, ее частичного выпаривания;
- емкости для транспортирования проб снеговой воды в научные центры для проведения дальнейших исследований.

Разработки такой ловушки начаты в 2012 г., создание макетного образца можно запланировать на 2014 г. Однако предварительно необходимо решить ряд технических проблем, связанных с конструкцией ловушки и с уменьшением ее массы, плавлением снега и центрифугированием полученной воды в горных условиях. Макетный образец ловушки можно будет установить и опробовать на вершине горы Яман-Тау (1640 м, Южный Урал) в феврале–марте 2015 г. Учет возможной доли земного вещества, выбрасываемого Белорецким металлургическим комбинатом и Учалинским горно-обогатительным комбинатом, в отобранных пробах можно будет произвести по данным экологического мониторинга воздушной среды го-

родов Белорецка и Учалов Республики Башкортостан по «отпечаткам» выбросов этих предприятий.

Для повышения чувствительности необходимо использовать метод концентрации талой воды, например, путем центрифугирования, как это делалось С. А. Булатом при исследовании образцов антарктического снега.

6.2. Предложения к программе исследования КП

В. Ю. Прокофьев

*Научно-исследовательский институт медицинских материалов
и имплантатов с памятью формы СФТИ при Томском университете*

1. Создание полевой лаборатории, которая включала бы в себя материалы и оборудование, необходимое для отбора проб на космическую пыль (палатка-тент, разборные столы, стулья, фильтровальное оборудование, различного рода ловушки на КП, ледовый бур и специальные инструменты для отбора проб и растапливания льда, специальная упаковка, набор лабораторной посуды, оборудование для первичного анализа — микроскопы, хим. реактивы и т. д., электрогенератор, освещение и т. д., и т. п.).

2. Разработка методик отбора проб КП с учетом международного опыта.

3. Проведение предварительных аналитических исследований с целью установления наиболее оптимальных географически мест отбора проб. Анализ гравитационных и магнитных аномалий. Поиск «чистых», в плане промышленного загрязнения, мест.

4. Создание специальных планшетов — накопителей для отслеживания современных выпадений КП в нескольких регионах (Арктика, Антарктика, Алтай, Памир, Кавказ, Гималаи и т. д.). Возможность кооперации в этой сфере с иностранными коллегами.

6.3. Программа РГКП по исследованию космической пыли на 2013–2017 г.

В. М. Лобанков¹, В. Ю. Прокофьев²

¹ *Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ)*

² *Научно-исследовательский институт медицинских материалов и имплантатов с памятью формы СФТИ при Томском университете*

Наименование и содержание работ	Срок проведения	Ответственные исполнители
1. Обоснование мест отбора проб образцов льда и снега с минимальным содержанием вещества земного происхождения	2013 г.	В. Ю. Прокофьев, В. М. Лобанков
2. Разработка и согласование рабочих методик отбора, упаковки, транспортирования и хранения проб льда и снега (с учетом международного опыта)	2013 г.	В. Ю. Прокофьев, В. М. Лобанков
3. Создание полевой гляциологической лаборатории с оборудованием для отбора и первичного анализа проб льда и снега	2013 г.	В. Ю. Прокофьев
4. Гляциологическая алтайская экспедиция по сбору космической пыли	2014 г.	В. Ю. Прокофьев
5. Создание макетного образца полевой ловушки свежевыпавшего снега для высокогорного сбора космической пыли	2014 г.	В. М. Лобанков
6. Опробование макетного образца полевой ловушки снега на горе Яман-Тау (1640 м)	2015 г.	В. М. Лобанков
7. Алтайская высокогорная экспедиция по сбору космической пыли	2016 г.	В. М. Лобанков
8. Анализ результатов измерений параметров образцов космического вещества, добытого из высокогорного льда и снега. Обоснование новой программы исследований на 2018–2025 гг.	2017 г.	Специалисты РГКП

7. СБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ — МХОВ СФАГНУМ БУРЫЙ (SPHAGNUM FUSCUM KLINGR)

7.1. Методика сбора образцов

А. П. Бояркина

ФГБУ «НИИ онкологии» СО РАМН, Томск

Мох сфагнум получает минеральное питание только из атмосферы, поэтому он может служить накопителем космической пыли. Перспективным следует считать торф из лесных районов, удаленных от промышленных центров. Ввиду достаточно широкой распространенности мха сфагнум бурый его исследование позволяет получить данные о динамике выпадения космической пыли на большой территории.

Методика сбора пыли с торфа разработана и проверена на практике томскими учеными. Она состоит в следующем.

На участке верхового сфагнового болота выбирается площадка с ровной поверхностью и торфяной залежью, сложенной мхом сфагнум бурый (*Sphagnum fuscum* Klingr). С ее поверхности на уровне моховой дернины срезаются кустарнички. Закладывается шурф на глубину до 60 см, у борта его размечается площадка нужного размера (например, 10 × 10 см), затем с двух или трех его сторон обнажается колонка торфа, разрезается на пласты по 3 см каждый, которые упаковываются в полиэтиленовые пакеты. Верхние шесть слоев (очес) рассматриваются совместно и могут служить для определения возрастных характеристик. Каждый пласт в лабораторных условиях промывается сквозь сито с диаметром ячеек 0,25 мм в течение не менее 5 мин. Прошедший сквозь сито гумус с минеральными частицами отстаивается до полного выпадения осадка, затем осадок сливается в чашку Петри, где высушивается. Упакованный в кальку, сухой образец удобен для перевозки и дальнейшего изучения. В соответствующих условиях образец озоляется в тигле и муфельной печи в течение часа при температуре 500–600 °С. Зольный остаток взвешивается и подвергается либо осмотру под бинокулярным микроскопом при увеличении в 56 раз на предмет выявления сферических частиц размером 7–100 и более мкм, либо другим видам анализа.

Для исключения загрязнения глобальным аэрозолем следует изучать глубинные слои торфяных отложений, консервирующих космическую пыль в доиндустриальный период.

На первом этапе предлагается провести аналитические исследования колонок торфа, отобранных летом 2011 г. в фоновом районе Томской области.

7.2. Аналитические исследования образцов торфа сфагнум

М. В. Фронтасьева

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна

Нейтронный активационный анализ позволяет определять во мхах до 45 элементов Периодической системы (Al, As, Au, Ba, Br, Ca, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Dy, Eu, Fe, Hf, Hg, I, In, La, Lu, Mg, Mn, Na, Nd, Ni, Rb, Sb, S, Sc, Se, Sm, Ta, Tb, Ti, Th, V, W, Yb, Zn), три элемента Cu, Cd и Pb определяют с помощью атомной абсорбционной спектрометрии. Более 15 лет сектор нейтронного активационного анализа и прикладных исследований Отделения ядерной физики Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) ОИЯИ участвует в международной программе «Heavy Metal Atmospheric Deposition in Europe – Estimations Based on Moss Analysis» («Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе — оценки на основе анализа мхов-биомониторов») и передает результаты анализа мхов, собранных на территории Центральной России, Урала, Болгарии, Румынии, Польши, Словакии, Хорватии, Албании, Сербии, Македонии и ряда других стран, в Европейский Атлас атмосферных выпадений тяжелых металлов, издаваемый каждые пять лет Экономической комиссией ООН по воздуху Европы.

В отличие от экологической программы, в рамках которой сбор образцов осуществляется вблизи промышленных центров, для исследования космической пыли сбор образцов должен производиться в районах, удаленных от промышленных центров [1–5].

Список литературы

1. *Фронтасьева М. В.* Нейтронный активационный анализ в науках о жизни // ЭЧАЯ. 2011. Т. 42, № 2. С. 636–716;
Frontasyeva M. V. Neutron Activation Analysis for the Life Sciences. A Review // Phys. Part. Nucl. 2011. V. 42, No. 2. P. 332–378;
<http://www.springerlink.com/content/i836723234434m27/>.
2. *Вергель К. Н., Фронтасьева М. В., Каманина И. З., Павлов С. С.* Биомониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов на северо-востоке Московской области с помощью метода мхов-биомониторов // Экология урбанизированных территорий. 2009. Вып. 3. С. 88–95.
3. *Barandovski L., Cekova M., Frontasyeva M.V., Pavlov S.S., Stafilov T., Steinnes E., Urumov V.* Atmospheric Deposition of Trace Element Pollutants in Macedonia Studied by the Moss Biomonitoring Technique // Environmental Monitoring and Assessment. 2008. V. 138. P. 107–118.
4. *Ermakova E. V., Frontasyeva M. V., Pavlov S. S., Povtoreyko E. A., Steinnes E., Cheremisina Ye. N.* Air Pollution Studies in Central Russia (Tver and Yaroslavl Regions) Using the Moss Biomonitoring Technique and Neutron Activation Analysis // Journal of Atmospheric Chemistry. 2004. V. 49. P. 549–561.
5. *Ermakova E. V., Frontasyeva M. V., Steinnes E.* Air Pollution Studies in Central Russia (Tula Region) Using the Moss Biomonitoring Technique, NAA and AAS // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2004. V. 259, No. 1. P. 51–58.

8. СБОР КП В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ И ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Сбор КП осуществляется в различных природных ландшафтах и средах: в снежном и ледовом покрове Арктики и Антарктики, на высокогорных ледниках, в глубоководном морском иле, в толще земных пород (см. выше). Во всех этих образцах доля космической пыли с ее отличительным химическим составом и морфологическими характеристиками исходно подлежит определению на фоне значительно большей доли земной пыли. Наименьшая доля земной пыли может оказаться в образцах, собранных в околоземном пространстве и межпланетной среде, при отборе с анализом непосредственно в космосе. Также представляется перспективным накопление КП с помощью специальных ловушек, установленных на космических аппаратах (КА) при обеспечении специальных мер от их загрязнения двигательными установками и научной аппаратурой КА. При этом необходимо обеспечить доставку ловушек после экспонирования на орбите на Землю. Для этой цели могут использоваться *возвращаемые* спутники или МКС. Следует также изучить возможность установки ловушек на высотных аэростатах. В ближайшее время можно использовать возвращаемые спутники типа «Бион» и «Фотон», разрабатываемые в ИМБП РАН.

8.1. Возможность сбора КП на КА «Бион» и «Фотон»

Е. А. Ильин¹, Л. М. Гиндилис², С. А. Булат³, В. Н. Снытников⁴

¹ *Институт медико-биологических проблем РАН (ИМБП РАН), Москва*

² *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

³ *Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ)*

⁴ *Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск*

Ловушки предназначены для сбора КП с целью последующего анализа на элементный и изотопный состав, органическую и минералогическую компоненту, а также на пред- и биологические объекты (биологические объекты космической пыли — БОКП). Ловушки с аэрогелем устанавливаются на внутренней стороне приборного отсека, расположенного снаружи КА. Во время орбитального полета крышки отсека открываются, и ловушка с аэрогелем открыта для сбора КП. До запуска и после приземления КА принимаются меры предосторожности против заражения образцов пылью земного происхождения. Ловушка БОКП с аэрогелем после приземления должна быть сразу же помещена в стерильный (деконтаминированный от земной пыли) контейнер и транспортироваться при отрицательной температуре (изотермический бокс с аккумуляторами холода при температуре -18°C) в ИМБП РАН. После доставки ловушки с гелем в ИМБП она до передачи заказчику хранится при отрицательной температуре.

Открывать контейнер можно только в специальных «чистых» помещениях и разбирать частицы вещества там же (нужен световой микроскоп с микроманипулятором и камерой). Предполагается отдельные частицы извлекать из геля и переносить манипулятором в специальном образом обработанные кварцевые кюветы с крышкой, очищенные от земной органики. Кюветы с частицами передаются на дальнейший анализ в специализированные лаборатории. Анализы включают разного рода микроскопию с зондами. Из отдельных частиц можно также попытаться выделить ДНК специальными наборами и амплифицировать гены типа микробных 16-18S рРНК. При достаточном количестве собранной КП перечень анализов может быть увеличен.

Основное ограничение при использовании КА этого типа связано с ограниченной площадью экспонирования. При экспозиции 30 сут *минимальная* площадь облучения составляет порядка 100 см².

Перспективным является использование высокоапогейных КА (с открытием ловушек на высокой орбите в целях предотвращения загрязнения космическим мусором), запуск которых планируется на 2017 г.

8.2. Сбор КП с помощью МКС

Л. М. Гиндилис¹, В. Н. Снытников²

¹ *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

² *Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск*

МКС позволяет установить ловушки с большей площадью экспонирования, чем на возвращаемых спутниках типа «Бион» и «Фотон», и обеспечить большую длительность экспозиции. Основная проблема связана с засорением пространства вокруг станции космической пылью. При этом пылевая компонента засорения не представляет существенной опасности, так как относительная скорость частиц и ловушки невелика, и частицы не проникают в глубь аэрогеля, оседая на его поверхности. Бóльшую опасность представляет газовая атмосфера вокруг станции, так как газы будут поглощены аэрогелем. Поскольку газы токсичны, это создает угрозу для последующей работы с аэрогелем. Эта проблема требует изучения. Необходимо разработать методы предотвращения или отделения частиц и газов, принадлежащих МКС, от тех же космической природы.

8.3. Разработка ловушек для КА

В. А. Игрицки¹, В. И. Майорова¹, В. Н. Снытников²

¹ *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ)*

² *Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск*

Ловушки представляют собой емкости, заполненные аэрогелем. Предполагается использовать аэрогель на основе оксида кремния. В Инсти-

туте катализа СО РАН имеется аэрогель на основе кремния, который используется в черенковских детекторах на МКС. Однако, как показала предварительная проработка, в силу технологических причин выпускаемый аэрогель черенковских детекторов напрямую не может быть применен для ловушек КП по размерам. В то же время необходимая по чистоте технология резки образцов аэрогеля отсутствует.

В состав геля входят кремний с кислородом и в качестве примесей такие элементы, как магний, железо, алюминий и другие, которые подлежат обнаружению в составе космической пыли. В целом это создает серьезные проблемы в анализе получаемой КП. Перспективным является использование геля, который может быть создан на основе циркония, гораздо менее космически распространенного элемента. Разработка аэрогеля на основе циркония может быть выполнена в Институте катализа СО РАН.

Поскольку аэрогель необходимо предохранить от земных загрязнений, сбор самой ловушки должен быть выполнен в «чистых» помещениях, а ее доставка и монтаж в герметичном корпусе. Предусматривается использование специальной крышки с фланцем. Для обеспечения надежной изоляции от земных газов и аэрозолей ловушку перед спуском на Землю следует заполнить инертным газом для предотвращения протечки снаружи внутрь. Разгерметизация должна проводиться в «чистых» помещениях постепенно через специальный клапан.

Разборку ловушки аэрогеля с КП для анализа на пред- и биологические объекты планируется проводить в чистой комнате ОИЯИ г. Дубны. Разборку ловушки аэрогеля с КП для анализа на элементный состав, органическую и минералогическую компоненту планируется проводить в чистой комнате ИК СО РАН (Новосибирск). Чистые комнаты с необходимым оборудованием должны быть созданы в ближайшее время.

9. БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КП (ПО ВСЕМ РАЗДЕЛАМ)

Е. А. Воробьева¹, М. М. Астафьева², С. А. Булат³, Е. А. Ильин⁴,
Е. А. Красавин⁵, А. Ю. Розанов^{2,5}

¹ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва

² Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка РАН (ПИН РАН),
Москва

³ Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ)

⁴ Институт медико-биологических проблем РАН (ИМБП РАН), Москва

⁵ Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна

Биологический интерес к исследованиям космической пыли имеет три аспекта: астробиологический, эволюционный и экологический. В первом случае это вопрос о распределении предбиологического и биологического вещества в Солнечной системе, возможности межпланетного обмена биологическим материалом, то есть проблема *транспермии*. Второй и третий аспекты касаются воздействия космического вещества: метеоритов и КП — на биологические и биогеохимические процессы в природных системах Земли.

Возможность того, что транспермия, межпланетный перенос микроорганизмов, может играть роль в происхождении жизни на Земле или распространении земной жизни на другие планеты (Марс) зависит от способности микроорганизмов выжить в космическом путешествии. Хотя большая часть межпланетного материала, достигающего Земли, провела в космосе несколько миллионов лет, подсчитано, что, по крайней мере, один из 10^7 марсианских метеоритов совершает межпланетное путешествие менее чем за год и что за миллион лет приблизительно десять метеоритов массой более 100 г попадают с Марса на Землю всего за два-три года [1].

С другой стороны, пылевые частицы могут мягко тормозиться в верхних слоях атмосферы Земли, выпадая, таким образом, на поверхность планеты без значительного разогрева внутреннего содержимого в пылевых конгломератах [2]. Однако неизвестно, достаточна ли жизнеспособность микроорганизмов, покоящихся форм или спор в течение собственно фазы космического транзита, чтобы обеспечить транспермию клеток, иммобилизованных в космическом веществе, в частности, в составе КП.

Экспонирование микроорганизмов в космосе вплоть до шести лет было изучено различными авторами [3–6] на низкой околоземной орбите, где воздействие радиации относительно мало, и за пределами земной магнитосферы, в условиях межпланетной радиационной среды, но в течение непродолжительного времени (несколько дней) [7–12]. Упомянутые исследования продемонстрировали возможность выживания в космосе различных организмов, среди которых, в аспекте транспермии, наибольший интерес представляют бактерии, археи и грибы.

Список литературы

1. *Gladman B.* Destination Earth: Martian Meteorite Delivery // *Icarus*. 1997. V. 130. P. 228–246.
2. *Horneck G., Facius R., Enge W., Beaujean R., Bartholoma K. P.* Microbial Studies in the Biostack Experiment of the Apollo 16 Mission: Germination and Outgrowth of Single *Bacillus Subtilis* Spores Hit by Cosmic HZE Particles // *Life Sci. Space Res.* 1974. V. 12. P. 75–83.
3. *Horneck G.* Responses of *Bacillus subtilis* Spores to Space Environment: Results from Experiments in Space // *Orig. Life Evol. Biosph.* 1993. V. 23(1). P. 37–52.
4. *Rettberg P., Eschweiler U., Strauch K., Reitz G., Horneck G., Wanke H., Brack A., Barbier B.* Survival of Microorganisms in Space Protected by Meteorite Material: Results of the Experiment «EXOBIOLOGIE of the PERSEUS Mission» // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30(6). P. 1539–1545.
5. *Баранов В. М., Новикова Н. Д., Поликарпов Н. А. и др.* Эксперимент «Биориск»: 13-месячная экспозиция покоящихся форм организмов на внешней стороне Российского сегмента международной космической станции (предварительные результаты) // *Доклады РАН*. 2009. Т. 426, № 5. С. 1–4.
6. *Bucker H., Horneck G., Allkofer O. C., Bartholoma K. P., Beaujean R., Cuer P., Enge W., Facius R., Francois H., Graul E. H., Henig G., Heinrich W., Kaiser R., Kuhn H., Massue J. P., Planel H., Portal G., Reinholz E., Ruther W., Scheuermann W., Schmitt R., Schopper E., Schott J. U., Soleilhavoup J. P., Wollenhaupt H.* The Biostack Experiment on Apollo 16 // *Life Sci. Space Res.* 1973. V. 11. P. 295–305.
7. *Bucker H., Horneck G.* The Biological Effectiveness of HZE-Particles of Cosmic Radiation Studied in the Apollo 16 and 17 Biostack Experiments // *Acta Astronaut.* 1975. V. 2(3–4). P. 247–264.
8. *Bucker H.* The Biostack Experiments I and II aboard Apollo 16 and 17 // *Life Sci. Space Res.* 1974. V. 12. P. 43–50.
9. *Facius R., Bucker H., Hildebrand D., Horneck G., Holtz G., Reitz G., Schafer M., Toth B.* Radiobiological Results from the *Bacillus subtilis* Biostack Experiments within the Apollo and the ASTP Space Flights // *Life Sci. Space Res.* 1978. V. 16. P. 151–156.
10. *Facius R., Bucker H., Horneck G., Reitz G., Schafer M.* Dosimetric and Biological Results from the *Bacillus subtilis* Biostack Experiment with the Apollo–Soyuz Test Project // *Life Sci. Space Res.* 1979. V. 17. P. 123–128.
11. *Graul E. H., Ruther W., Heinrich W., Allkofer O. C., Kaiser R., Pfohl R., Schopper E., Henig G., Schott J. U., Bucker H.* Radiobiological Results of the Biostack Experiment on Board Apollo 16 and 17 // *Life Sci. Space Res.* 1975. V. 13. P. 153–159.
12. *Rettberg P., Eschweiler U., Strauch K., Reitz G., Horneck G., Wanke H., Brack A., Barbier B.* Survival of Microorganisms in Space Protected by Meteorite Material: Results of the Experiment «EXOBIOLOGIE of the PERSEUS Mission» // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30(6). P. 1539–1545.

9.1. Перспективы исследования КП на МКС (см. п. 8.2)

Даже достаточно длительные космические эксперименты по экспонированию организмов в открытом космосе и оценке длительности их жизнеспособности не могут быть с уверенностью экстраполированы на геологическое (космическое) время. Более определенный ответ по проблеме транспермии могут дать прямые исследования космической пыли, собранной ловушками (разд. 8) в течение продолжительного экспонирования в космосе. На сегодняшний день такую возможность может предоставить только МКС или, в недалеком будущем, программа лунных исследований. Некоторое количество КП могут доставить и КА кратковременной экспозиции: «Бийон», «Фотон» (п. 8.1).

Перспективность использования МКС не ограничивается установкой длительно функционирующих ловушек. Поверхность КА является матрицей для иммобилизации КП, и за время эксплуатации станции (более 13 лет) эта поверхность, несомненно, накопила значительную информацию о космической среде на низкой околоземной орбите. Первый опыт биологического анализа этой информации получен в этом году междисциплинарной группой МГУ — ИКИ РАН (биологический ф-т МГУ, ф-т почвоведения МГУ, ИКИ РАН: Алехова Т. А., Воробьева Е. А., Шестаков А., Александрова А.), исследовавшей материалы с внешней поверхности МКС на возможное присутствие микроорганизмов. В настоящее время проводится изучение поверхностных характеристик этих материалов.

9.2. Моделирование

Моделирование процессов в космической среде проводилось Е. А. Воробьевой (Институт космических исследований РАН), А. К. Павловым (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН) и др.

Иммобилизация на минеральной матрице, по-видимому, является необходимым условием для обеспечения предполагаемого транзита биомолекул и клеток в космической среде. Известно, что бактерии, обладая различным зарядом клеточной стенки, избирательно взаимодействуют с различными минералами. Следовательно, космическая пыль различного минералогического состава может нести различную биогенную нагрузку, обладая или не обладая сродством к биомолекулам и клеткам. Эти процессы должны определять как устойчивость последних в космической среде, так и направленность процессов взаимодействия КП с биологическими компонентами в естественных биотопах Земли с учетом их собственных характеристик. Моделирование КП и взаимодействия минеральных моделей с биомолекулами и микроорганизмами в «космической» и «земной» среде представляется перспективным для изучения возможного активизирующего или, напротив, токсического воздействия различных вариаций КП

на живое вещество, равно как воздействие метаболитов на частицы КП. Предполагается (см., например, разд. 4), что минералогический состав околоземной космической пыли в ископаемом состоянии и состав межпланетной пыли, собранной ловушками, различен. Не исключено, что такое различие в некоторой степени определяется имеющимися методическими возможностями выявления КП в составе земной компоненты. Самородные металлы и магнитные минералы внеземного происхождения, по-видимому, легче обнаружить, чем, например, внеземные силикаты или сульфиды. Моделирование позволит изучить взаимодействие различных типов КП с биологическими объектами.

В ФТИ РАН им. А. Ф. Иоффе (А. К. Павлов) разработана вакуумная камера для моделирования ряда параметров открытого космоса или планетарных сред, перспективная для использования в модельных экспериментах. Результаты целесообразно сопоставить с воздействием естественной КП идентичного состава на природные биологические системы. Такие эксперименты подразумевают комплексные междисциплинарные исследования с применением методов микробиологического и молекулярно-генетического анализа, высокоразрешающей микроскопии (сканирующая электронная микроскопия СЭМ, трансмиссионная электронная микроскопия ТЭМ, атомно-силовая микроскопия АСМ), рентгено-структурного анализа и др. При достаточной чувствительности возможно использование и метода кирлиановского свечения для оценки возможной активизации клеток (биомассы) в присутствии КП (Ануфриева Е. И., Ануфриев В. П. — Ин-т физики металлов УрО РАН, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина — УрФУ).

9.3. Сбор материала

Необходимым условием успеха биологических исследований КП является организация экспедиций с целью отбора материала в местах предполагаемого повышенного выпадения космического вещества в настоящее время или в прошлом, отработка методов обнаружения КП в природных планшетах и концентрации активной фракции (разд. 5–7). Для эволюционных исследований значительную ценность может представить коллекция образцов древней мерзлоты Арктики (Восточная Сибирь) и Антарктиды различного генезиса, возраст которой (возраст мерзлоты) представлен на геологической шкале от настоящего времени до 3–4 млн лет назад. Подобная коллекция сформировалась за три десятилетия исследований в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения (ИФХиБПП) РАН (Пушино) и на факультете почвоведения МГУ. По-видимому, возможен и дополнительный отбор образцов в рамках ежегодной экспедиции «Берингия» (ИФХиБПП РАН) в Нижнеколымский район республики Саха (Якутия). Однако нужно определиться с необходимой и достаточной массой образцов мерзлоты для анализа.

9.4. Методы анализа

Бактериально-палеонтологические методы развиваются в Палеонтологическом институте им. А. А. Борисяка РАН (А. Ю. Розанов, М. М. Астафьева и др.).

Важным направлением эволюционно-биологических исследований является анализ имеющейся обширной базы данных, а также получение новых данных в области бактериальной палеонтологии древнейших осадочных пород Земли с учетом визуального выявления морфоформ (СЭМ) с элементным спектром, позволяющим отнести объекты наблюдения к частицам КП различного типа, либо масс-спектрометрическими методами анализа (масс-спектрометр NanoSIMS50). Исследование пространственно-временного распределения таких частиц в породах Земли, взаимодействия с ними биоты, как в современных, так и в древних экотопах, позволит проследить фрактальную динамику взаимодействия земного и космического вещества.

Методы исследования наночастиц. Применительно к КП такие исследования проводились Е. М. Егоровой (Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии РАМН) — см. п. 11.4, Е. А. Воробьевой (Институт космических исследований РАН) и И. В. Яминским (МГУ им. М. В. Ломоносова).

Высокоразрешающие микроскопические методы исследования встречаются с определенными трудностями обнаружения и идентификации КП в составе пород вследствие низких концентраций частиц КП. Необходим дальнейший поиск и разработка методов фракционирования, концентрации и неразрушающего анализа пород, содержащих внеземной материал (см. разд. 10, 11). С биологической точки зрения отдельный интерес представляют методы, позволяющие исследовать распределение всей наблюдаемой совокупности частиц по размерам с последующей концентрацией и изучением нанометровой фракции (от 100 нм, желательнее, от 200 нм). Эта фракция, в соответствии с существующими данными, должна содержать как частицы КП, так и клетки ультрамикробактерий (нанобактерий). Последующее изучение фракции методами высокоразрешающей микроскопии (ТЭМ, АСМ) позволит исследовать, например, сорбционные взаимодействия минеральных и биологических частиц. Дополнительный результат можно получить, обеспечив возможность индикации флуоресценции (например, использование ближнепольной микроскопии), что открывает широкие возможности для маркерной биологической, в том числе молекулярно-генетической, характеристики микроорганизмов, взаимодействующих с КП. Отметим также возможности исследования магнитных и электрических свойств исследуемых частиц методами зондовой микроскопии. Подобный подход может быть использован как в моделях, так и при прямом анализе природного материала.

Методы микробиологического, биохимического и молекулярно-генетического анализов развиваются С. А. Булатом (Петербургский институт ядерной физики) и Е. А. Воробьевой (Институт космических исследований РАН).

Микробиологические и биохимические методы подразумевают исследование воздействия КП на репродуктивную и метаболическую активность микроорганизмов, а также использование микроморфологических методов анализа микрочастиц. Методы молекулярно-генетического анализа могут быть использованы для оценки структуры микробных сообществ *in situ* (без выделения культур микроорганизмов) (п. 10.3.2), исследования динамики отдельных популяций, идентификации изолятов [1–15].

Список литературы

1. Баранов В. М., Новикова Н. Д., Поликарпов Н. А. и др. Эксперимент «Биориск»: 13-месячная экспозиция покоящихся форм организмов на внешней стороне Российского сегмента международной космической станции (предварительные результаты) // Доклады РАН. 2009. Т. 426, № 5. С. 1–4.
2. Anders E. Pre-Biotic Organic Matter from Comets and Asteroids // Nature. 1989. V. 342. P. 255–257.
3. Gladman. B. Destination Earth: Martian Meteorite Delivery // Icarus. 1997. V. 130. P. 228–246.
4. Bucker H., Facius R., Hildebrand D., Horneck G. Results of the Bacillus Subtilis Unit of the Biostack II Experiment: Physical Characteristics and Biological Effects of Individual Cosmic HZE Particles // Life Sci. Space Res. 1975. V. 13. P. 161–166.
5. Bucker H., Horneck G., Allkofer O. C., Bartholoma K. P., Beaujean R., Cuer P., Enge W., Facius R., Francois H., Graul E. H., Henig G., Heinrich W., Kaiser R., Kuhn H., Massue J. P., Planel H., Portal G., Reinholz E., Ruther W., Scheuermann W., Schmitt R., Schopper E., Schott J. U., Soleilhavoup J. P., Wollenhaupt H. The Biostack Experiment on Apollo 16 // Life Sci. Space Res. 1973. V. 11. P. 295–305.
6. Bucker H., Horneck G. The Biological Effectiveness of HZE-Particles of Cosmic Radiation Studied in the Apollo 16 and 17 Biostack Experiments // Acta Astronaut. 1975. V. 2(3–4). P. 247–264.
7. Bucker H. The Biostack Experiments I and II aboard Apollo 16 and 17 // Life Sci. Space Res. 1974. V. 12. P. 43–50.
8. Facius R., Bucker H., Hildebrand D., Horneck G., Holtz G., Reitz G., Schafer M., Toth B. Radiobiological Results from the Bacillus subtilis Biostack Experiments within the Apollo and the ASTP Space Flights // Life Sci. Space Res. 1978. V. 16. P. 151–156.
9. Facius R., Bucker H., Horneck G., Reitz G., Schafer M. Dosimetric and Biological Results from the Bacillus subtilis Biostack Experiment with the Apollo–Soyuz Test Project // Life Sci. Space Res. 1979. V. 17. P. 123–128.
10. Graul E. H., Ruther W., Heinrich W., Allkofer O. C., Kaiser R., Pfohl R., Schopper E., Henig G., Schott J. U., Bucker H. Radiobiological Results of the Biostack Experiment on Board Apollo 16 and 17 // Life Sci. Space Res. 1975. V. 13. P. 153–159.

11. *Horneck G., Facius R., Enge W., Beaujean R., Bartholoma K. P.* Microbial Studies in the Biostack Experiment of the Apollo 16 Mission: Germination and Outgrowth of Single *Bacillus subtilis* Spores Hit by Cosmic HZE Particles // *Life Sci. Space Res.* 1974. V. 12. P. 75–83.
12. *Horneck G.* Responses of *Bacillus subtilis* Spores to Space Environment: Results from Experiments in Space // *Orig. Life Evol. Biosph.* 1993. V. 23(1). P. 37–52.
13. *Jönsson K. I., Rabbow E., Schill R. O., Harms-Ringdahl M., Rettberg P.* Tardigrades Survive Exposure to Space in Low Earth Orbit // *Current Biology.* 2008. V. 18(17). P. R729–R731.
14. *Reitz G., Horneck G., Facius R., Schafer M.* Results of Space Experiments // *Radiat. Environ. Biophys.* 1995. V. 34(3). P. 139–144 (Review of Entire Biostack Program).
15. *Rettberg P., Eschweiler U., Strauch K., Reitz G., Horneck G., Wanke H., Brack A., Barbier B.* Survival of Microorganisms in Space Protected by Meteorite Material: Results of the Experiment «EXOBIOLOGIE of the PERSEUS Mission» // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30(6). P. 1539–1545.

10. ВЫДЕЛЕНИЕ КОСМОГЕННОЙ КОМПОНЕТЫ

В. А. Цельмович¹, С. А. Булат²

¹ *Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН*

² *Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ)*

10.1. Признаки космогенной составляющей в образцах пыли на Земле

10.1.1. По магнитной компоненте:

10.1.1.1. Наличие большого количества магнетитовых «космических шариков».

10.1.1.2. Наличие самородных металлов (Fe, Ni, Cr, Co, W) и интерметаллидов при обязательном присутствии чистого никеля, камасита, тэнита.

10.1.1.3. Наличие чешуйчатой структуры в частицах самородного металла.

10.1.1.4. Наличие шрейберзита, а в нем — характерных треков от импактных металлических частиц.

10.1.1.5. Характерное распределение примеси никеля в FeNi-сплаве из метеоритов, с пиком на 6% Ni.

10.1.2. Обнаружение (методом катодолюминесценции) фаз, образующихся при высоком давлении: алмаза, муассанита, корунда.

10.1.3. Обнаружение других фаз, характерных для космического вещества: силицида железа, алюминидов железа и никеля и др.

10.2. Методы выделения космогенной составляющей

10.2.1. Выделение магнитной компоненты сильным постоянным магнитом.

10.2.2. Выделение минералов в тяжелых жидкостях.

10.2.3. Обнаружение фаз высокого давления методом катодолюминесценции, их идентификация по спектрам катодолюминесценции и последующий микронзондовый анализ.

10.2.4. Диагностика структуры выделенных минералов методом дифракции обратно отраженных электронов (ДОЭ, EBSD).

Для выделения космогенной составляющей может использоваться также исследование структуры частиц и распределение частиц по размерам (космогенная составляющая имеет степенное распределение).

10.3. Процедура выделения

Каждый образец делится на три части. Проводятся такие исследования:

10.3.1. Первая треть образца.

10.3.1.1. Предварительно обширную и оперативную информацию о распределении металлических частиц, таких как железо, никель и их сплавы, можно получить по данным термомагнитного анализа (ТМА) космической пыли и осадков, ее содержащих.

10.3.1.2. После предварительного термомагнитного анализа коллекция образцов передается для:

10.3.1.3. Выделения космических микрочастиц для последующего их микрозондового изучения на предмет наличия признаков космогенной компоненты по 11.1.1–11.1.3.

10.3.1.4. Приготовления шлифов (аншлифов) и определения содержания иридия как индикатора космической компоненты.

10.3.1.5. Выделения тяжелой фракции и подготовки препаратов для микрозондового анализа.

10.3.1.6. После получения предварительных результатов решается вопрос о проведении изотопно-геохимических исследований как породы в целом, так и мономинеральных фракций (изотопия углерода, кислорода, гелия, осмия).

10.3.1.7. Анализ отдельных зерен минералов (поле анализа 15–20 мкм) с использованием ионного микрозонда (SIMS) и лазерной абляции с индуктивно связанной плазмой (LA-ICP-MS). Микрозондовый анализ состава и структуры зерен с использованием метода дифракции обратнорассеянных электронов (ДОЭ, EBSD) и катодолуминесценции.

10.3.1.8. Анализ микрофоссилий в космической пыли из древнейших осадков на микронном уровне с использованием масс-спектрометра NanoSIMS 50.

10.3.1.9. Для выделения космогенной составляющей может использоваться также исследование структуры частиц методами рентгеновской дифракции и дифракции обратнорассеянных электронов (ДОЭ, EBSD), а также распределение частиц по размерам (космогенная составляющая имеет степенное распределение).

10.3.2. Вторая треть образца.

Анализ образца КП на присутствие органических молекул и ДНК микроорганизмов (аналитическая химия и молекулярная биология водорастворимой фракции) — требуется особая методика подготовки, проб и проведения исследования.

10.3.3. Последняя треть образца.

Архивировать (–15 °С) на предмет повторного исследования.

11. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КП

11.1. Термомагнитный анализ

Д. М. Печерский

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва

Для массового изучения распространения частиц *самородного* железа и других магнитных минералов космического происхождения рекомендуется применять *термомагнитный анализ* (ТМА) [1–8]. Дело в том, что при исследовании космической пыли данные о распределении космических частиц как по поверхности Земли, так и во времени обычно использовались «прямые» методы фиксации таких частиц. Эти методы требуют большого объема материала, и по ним получаются осредненные данные. Обширную и оперативную информацию о распределении самородного железа можно получить по данным термомагнитного анализа осадков. ТМА широко применяется в петромагнитной и палеомагнитной практике, но только до 700 °С (основные носители магнетизма в земных горных породах титаномагнетиты и гематит имеют максимальную точку Кюри 680 °С), тогда как точки Кюри основной массы самородного железа 700–770 °С! Главные достоинства ТМА по сравнению с другими методами исследования вещества: а) получение информации о минералах, содержащихся в горной породе без их извлечения; б) очень высокая чувствительность (достаточно присутствия в породе менее 0,00001 % железа и т. п. минералов); в) простота приготовления образцов (берется кусочек произвольной формы массой 0,1 г и меньше); г) быстрота анализа (примерно 20 мин на один анализ). ТМА проводится с помощью экспресс-весов Кюри [9] и термовибромагнитометра конструкции Н. М. Аносова и Ю. К. Виноградова (РАН). В наших экспериментах относительная точность определения вклада намагниченности данного магнитного минерала в величину намагниченности образца не лучше 10 %, соответственно, не выше и относительная точность определения концентрации частиц железа и сплава, точность определения точки Кюри составляет примерно 10 °С, чему отвечает содержание примесей (никеля) в сплаве 2–2,5 %, то есть можно принять, что ошибка каждого определения не превышает 3 %. Недостатки в точности ТМА компенсируются простотой приготовления проб, быстротой и массой получаемых данных.

Исследования концентрации частиц самородного железа и содержания в них примеси никеля выполнены для осадков миоценового, датского, мелового, инижнекембрийского возраста из 16 разрезов эпиконтинентальных осадков разного типа от чисто карбонатных до терригенных песчано-глинистых Австрии (Гамс), Грузии (Квиринаки и Тетрицкаро), Казахстана (Кошак), Крыма (Верхоречье и Сельбухра), Поволжья (Ключи и Тепловка), Северного Кавказа (Аймаки, Басс, Гергебиль, Дженгутай и Маджалис), Туркмении (Кара-Кала и Халац), СЗ Сибири (Сухариха), а также для

глубоководных осадков СЗ Атлантики (колонки 386, 387, 391А, С рейсов DSDP), осадков современных озер Байкал (колонки BDP-98 и BDP-99) и Дархад (колонка DBC-1).

Во-первых, частицы самородного железа присутствуют в изученных отложениях повсеместно. Уровень концентраций несколько меняется в зависимости от условий накопления осадков в разное время, можно говорить пока по крайней мере о четырех интервалах относительного глобального обогащения: 1) 12–13 Ма, интервал находится внутри сerratальского стратиграфического яруса миоцена; 2) 64–66 Ма, интервал включает границу мезозоя и кайнозоя; 3) 84–86 Ма, интервал охватывает сантон, ярус позднего мела; 4) 94–96 Ма, интервал находится внутри сеномана, стратиграфического яруса позднего мела.

Во-вторых, распределение их концентраций в разных разрезах не одинаково, т. е. неравномерно распределение по поверхности Земли, но четко видна «нулевая» группа осадков, не содержащих частиц железа. Такое бимодальное распределение частиц на две группы носит закономерный глобальный характер, оно наблюдается во *всех* изученных объектах. Бимодальное распределение мы объясняем следующим образом. Облако космической пыли и падающие из него на Землю частицы — это как туча, из которой капают капли дождя. Число частиц в космической пыли конечное, по существующим данным их более 60 тысяч в одном кубическом метре, а металлических частиц заметно меньше. Это значит, что из десяти кубических сантиметров только в один попадет частичка космической пыли, которая падает на сплошной слой осадка. Соответственно, во многих исследованных нами образцах просто отсутствуют частицы космической пыли, они и образуют «нулевую» группу на гистограмме. Вторая (ненулевая) группа, очевидно, представляет основной фон неравномерного распределения частиц самородного железа. Эта группа отражает распределение частиц самородного железа в осадках, выпавших из космической пыли. Если бы нулевая группа целиком относилась к космической пыли, в которой отсутствуют частицы самородного железа, то общее распределение всех частиц должно было быть близким к пуассонову, а не бимодальному. Важно подчеркнуть, что эта специфика не зависит от литологических особенностей осадков, окислительно-восстановительных условий их накопления и дальнейшего существования (например, наличие или отсутствие пирита) региона, например, на дне океана или на континенте, от возраста от миоцена до кембрия, т. е. эта закономерность носит глобальный характер. В отличие от космических частиц распределение содержания магнетита заведомо земного происхождения в тех же осадках имеет одномодальное, близкое к логнормальному распределение.

В-третьих, часто отсутствует корреляция содержания космического железа с земными минералами (магнетитом и титаномагнетитом, суммарным содержанием железосодержащих парамагнитных минералов, выраженным в парамагнитной намагниченности образцов), что свидетельствует о том, что накопление самородного железа в рассматриваемых осадках чаще происходило непосредственно из космических источников.

В-четвертых, частицы железа по содержанию в них примеси никеля образуют три группы:

1) чистое железо, такие частицы образуют обособленную группу, а не непрерывный ряд твердых растворов Fe-Ni;

2) группа с модой $\sim 5\%$ никеля. Очевидно, это частицы камасита, наиболее распространенного в метеоритах и космической пыли металла. Очень близки средние и модальные содержания примеси никеля в частицах самородного железа из эпиконтинентальных осадков Евразии и океанских осадков Атлантики. Это подчеркивает глобальную особенность состава частиц самородного железа. Глобальный характер распределения содержания никеля в самородном железе подчеркивается также сходством гистограмм для океанских осадков Атлантики и эпиконтинентальных отложений Евразии. Более того, характер распределения содержания никеля в частицах железа в осадках повторяет содержание никеля в металлической части метеоритов [3, 10, 11]. Отсюда можно заключить, что главный источник частиц железа в осадках — метеориты, точнее говоря, частицы самородного железа в осадках и никелистого железа в метеоритах имеют единое происхождение: и те, и другие — продукты разрушения вещества планет (планеты). Следовательно, эти металлические частицы из космической пыли, попадающие в земные осадки, логично называть микрометеоритами;

3) частицы Fe-Ni-сплава с содержанием никеля от 20% вплоть до чистого никеля. Две первые группы, особенно первая (частицы, не содержащие никеля), имеют повсеместное распространение и связаны, главным образом, с продуктами выпадения на Землю космической пыли. Третья группа — частицы Fe-Ni-сплава с высоким содержанием никеля — встречаются очень редко и имеют сугубо локальное распространение и, скорее, связаны прямо или косвенно с падающими на Землю метеоритами. Так, например, частицы самородного никеля известны в пограничном слое К/Т в разрезе Гамс (Австрия), где впервые обнаружены с помощью ТМА, и Стивен-Клинт (Дания) в верхнепермских отложениях Мейшаня (Китай), девонских отложениях Подолья (Украина) [12] и некоторых других объектах. Отсутствие корреляции между содержаниями никеля в частицах второй и третьей групп ($r = -0,045$) подчеркивает разное их происхождение.

Связь содержания частиц железа с содержанием в них примеси никеля отсутствует: коэффициент корреляции между ними равен $r = -0,024$.

Роль переотложения частиц железа оценена по корреляции логарифмов концентраций самородного железа и магнетита + титаномагнетита земного происхождения в осадке (распределение тех и других близко к логнормальному). Получено, что эффект переотложения отсутствует в подавляющем большинстве эпиконтинентальных осадков, в океанских же осадках (кроме сквжин 386, где $r = -0,105$) коэффициенты корреляции составляют 0,28–0,44, что свидетельствует о довольно заметной роли переотложения этих частиц и/или заметной роли среди них частиц земного происхождения. Для них же характерны наиболее низкие концентрации частиц железа.

Таким образом, роль переотложения выражается, во-первых, в появлении корреляции концентраций частиц железа с земными минералами (например, магнетитом), во-вторых, в сглаживании и снижении концентрации частиц железа.

В-пятых, распределение частиц самородного железа не зависит от окислительно-восстановительной обстановки в осадках, что видно по распределению в них пирита (пиритовый пик на кривых $M(T)$). С другой стороны, с распределением пирита согласуется распределение в осадках частиц магнетита + титаномагнетита терригенно-вулканогенной природы, между ними существует обратная корреляция, что можно объяснить а) частичным растворением магнетита + титаномагнетита в восстановительных условиях диагенеза, где образуется пирит и другие Fe-сульфиды, и б) ононосительно высокоокислительной обстановкой в осадках, где присутствуют титаномагнетит+магнетит, пирит и другие Fe-сульфиды не образуются.

В-шестых, в результате обобщения термомагнитных данных и данных о скорости осадконакопления обнаружена тенденция к росту «нулевой» группы с увеличением скорости осадконакопления, т.е. чем больше скорость накопления осадка, тем меньше в нем накапливается космических частиц (а не земных). На разброс влияет степень переотложения частиц железа и возможное их земное происхождение.

Таким образом, имеющийся опыт термомагнитного изучения осадочных пород показывает, что это *метод массового быстрого анализа отложенный на предмет обнаружения в них магнитных частиц космического происхождения*; имеет смысл коллекции осадочных пород, предназначенные для изучения космических частиц, предварительно прогонять на ТМА.

Термомагнитный анализ — способ быстрого статистического распознавания присутствия и преобладания в осадочных породах внеземных магнитных частиц. *Это а) бимодальное распределение содержания частиц самородного железа с обязательной ярко выраженной «нулевой» группой, что является одним из однозначных признаков присутствия (преобладания) в осадках частиц самородного железа космического происхождения; б) отсутствие корреляции концентрации частиц самородного железа с концентрациями в осадках минералов земного происхождения, таких как магнетит и др.; в) обратная зависимость накопления в осадках частиц железа от скорости осадконакопления. Эти признаки являются прямым свидетельством внеземного происхождения таких частиц самородного железа.* На сегодня термомагнитный анализ — единственный метод такой оценки.

Малый размер проб (менее 0,1 г) позволяет *проследживать весьма детально распределение внеземных магнитных частиц во времени.*

Список литературы

1. *Pechersky D.M. Metallic Iron in Sediments at the Mesozoic-Cenozoic (K/T) Boundary // Rus. J. Earth Sci. 2008. V.10, No.6. ES6006; doi:10.2205/2008ES000304.*

2. *Pechersky D.M., Nurgaliev D.K., Trubikhin V.M.* Native Iron in Miocene Sediments // *Russ. J. Earth Sci.* 2008. V.10, No.6. ES6004; doi:10.2205/2008ES000306.
3. *Печерский Д. М., Нургалиев Д. К., Фомин В. А., Шаронова З. В., Гильманова Д. М.* Космическое железо в осадках мела-даня // *Физика Земли.* 2011. № 5. С. 12–34.
4. *Печерский Д. М., Шаронова З. В.* Термомагнитное свидетельство наличия частиц самородного железа в осадках // *Физика Земли.* 2012. № 4. С. 38–44.
5. *Печерский Д. М., Гильманова Д. М., Марков Г. П., Мурдмаа И. О., Нургалиев Д. К., Цельмович В. А., Шаронова З. В.* Самородное железо и другие магнитные минералы в осадках северо-западной Атлантики: результаты термомагнитного и микронзондового анализов // *Физика Земли.* 2013. № 3. С. 131–153.
6. *Печерский Д. М., Шаронова З. В.* Связь концентраций частиц самородного железа в осадках со скоростью их накопления: обобщение термомагнитных данных // *Физика Земли.* 2013. № 5. С. 125–131.
7. *Печерский Д. М., Гильманова Д. М., Иванов Е. В., Кузьмин М. И., Марков Г. П., Нургалиев Д. К., Цельмович В. А.* Самородное железо в осадках озера Байкал (скважина BDP-98): результаты термомагнитного анализа // *Геология и геофизика.* 2013. № 9.
8. *Печерский Д. М., Гильманова Д. М., Казанский А. Ю., Кривоногов С. К., Нургалиев Д. К., Цельмович В. А.* Самородное железо в четвертичных отложениях дархадской впадины, северная Монголия // *Геология и геофизика.* 2013. № 12.
9. *Буров Б. В., Нургалиев Д. К., Ясонов П. Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во КГУ, 1986.
10. *Грачев А. Ф., Корчагин О. А., Цельмович В. А., Коллманн Х. А.* Космическая пыль и микрометеориты в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и химический состав // *Физика Земли.* 2008. № 7. С. 42–57.
11. *Grachev A. F., Kollmann H. A., Korchagin O. A. et al.* The K/T Boundary of Gams (Eastern Alps, Austria) and the Nature of Terminal Cretaceous Mass Extinction / Ed. A. F. Grachev // *Abhandlungen der geologischen bundesanstalt.* 2009. band 63. P. 89–134.
12. *Корчагин О. А.* Ископаемые микрометеориты, микротектиты и микрокриститы: методика исследований, классификация и импакт-стратиграфическая шкала // *Стратиграфия в начале XXI века — тенденции и новые идеи. Очерки по региональной геологии России.* М.: Геолкарт-ГЕОС, 2013. Вып. 6. С. 112–142.

11.2. Спектрофотометрия в отраженном свете

В. В. Бусарев

*Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
МГУ (ГАИШ МГУ), Москва*

В качестве неразрушающего метода исследований образцов КП (вплоть до микронного размера) предлагается использовать микроспектрофотометрию. Имеющийся опыт изучения природных объектов в широком диа-

пазоне размеров с помощью спектрофотометрии показывает [1–3], что основной минералогический состав их вещества может быть оценен по спектрам диффузного отражения, полученным при некоторых стандартных условиях в диапазоне 0,4–1,1 мкм (примерно соответствующем «окну» наибольшей прозрачности земной атмосферы в случае наблюдения твердых небесных тел). При расширении используемого спектрального диапазона как в коротковолновую, так и в длинноволновую стороны (что удается реализовать, как правило, в лабораторных условиях) появляется возможность получения дополнительной полезной информации о химическом и минеральном составе образцов. Кроме того, наличие спектров отражения образцов КП позволит выполнять их прямое сравнение с имеющимися спектрами отражения астероидов и других малых тел Солнечной системы и, таким образом, расширять референтную базу при изучении последних.

Список литературы

1. *Adams J. B.* Visible and Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra of Pyroxenes as Applied to Remote Sensing of Solid Objects in the Solar System // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. P. 4829–4836.
2. *Bradley J. P., Keller L. P., Brownlee D. E., Thomas K. L.* Reflectance Spectroscopy of Interplanetary Dust Particles // *Met. Planet. Sci.* 1996. V. 31. P. 394–402.
3. *Бусарев В. В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33, № 2. С. 140–150.

11.3. Исследование КП методами ядерной физики

В. Н. Швецов, П. В. Седышев, М. В. Фронтасьева, И. А. Бобриков
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна

11.3.1. Нейтронный активационный анализ (НАА) — М. В. Фронтасьева.

Для определения элементного состава образцов может использоваться метод нейтронного активационного анализа НАА (см. п. 7.2)

11.3.2. Нейтронный резонансный анализ (НРА) — П. В. Седышев.

Важным признаком космогенной составляющей является содержание иридия. Для его регистрации и определения других тяжелых изотопов может использоваться импульсный источник резонансных нейтронов ИРЕН ЛНФ ОИЯИ.

Исследования будут проводиться с применением анализа по нейтронному резонансному захвату (neutron resonance capture analysis (NRCA)). Известно, что сечения взаимодействия нейтронов низких энергий с ядрами имеют ярко выраженный резонансный характер. Величины сечений в резонансах во много раз (до 10^4) больше, чем в межрезонансной области. Рас-

стояния между резонансами варьируются от изотопа к изотопу от ~ 1 эВ до ~ 1 кэВ. Т.е. в интервале от тепловой энергии до нескольких кэВ наблюдается несколько нейтронных резонансов для каждого изотопа. К настоящему времени параметры низколежащих резонансов (энергия, ширины реакций) определены с хорошей точностью практически для всех стабильных изотопов. При этом набор резонансов является характерным для каждого изотопа, и нет изотопов, для которых абсолютно совпала бы по энергии пара резонансов. Таким образом, по энергиям резонансов идентифицируется изотоп, а по выходу продуктов реакции в резонансе определяется его содержание в образце. Спектрометрия нейтронов осуществляется по времени пролета на импульсном источнике нейтронов. При нейтроном резонансном анализе, как правило, регистрируются γ -кванты из реакции (n, γ) на изотопах образца. Для этого образец окружается высокоэффективными детекторами γ -квантов в геометрии, близкой к 4π . Спектрометрии γ -квантов не требуется, достаточно сигнала детектора, свидетельствующего о регистрации γ -кванта. Эффективность регистрации событий от (n, γ) -реакций повышается для более тяжелых элементов за счет разрядки возбужденного состояния после захвата нейтрона испусканием каскада 5–7 γ -квантов.

Нейтронный резонансный анализ (НРА) имеет сходство с более известным инструментальным методом — анализом по мгновенным γ -квантам при захвате тепловых нейтронов (prompt gamma activation analysis PGAA). Чувствительность к элементам сравнима для обоих методов [1]. Применение НРА ограничено для определения легких элементов ($Z \leq 14$), но более эффективно по сравнению с PGAA для элементов с $Z \geq 28$. К преимуществам НРА также относятся: неразрушающий характер, возможность исследовать образцы достаточно крупных размеров любой формы, отсутствие остаточной наведенной активности, чувствительность к изотопному составу образца. Последнее может быть перспективным для определения космогенной составляющей образцов, содержащих КП, а также для исследования других объектов неземного происхождения.

В ЛНФ ОИЯИ импульсным источником нейтронов является установка ИРЕН [2] на базе линейного ускорителя электронов с неразмножающей вольфрамовой мишенью, ширина его вспышки (100 нс) позволяет осуществлять спектрометрию нейтронов с высоким разрешением. Имеются пучковая инфраструктура и детекторы γ -квантов высокой эффективности. Установка ИРЕН функционирует в режиме опытной эксплуатации с поэтапным развитием. В настоящее время интегральный поток нейтронов составляет $\sim 10^{11}$ с $^{-1}$. Полномасштабная установка (планируется к 2015 г.) будет давать выход нейтронов в несколько единиц на 10^{13} с $^{-1}$.

Список литературы

1. Postma H., Schillebeeckx P. Non-Destructive Analysis of Objects Using Neutron Resonance Capture // J. Radioanalytic. Nucl. Chem. 2005. V. 265. P. 297–302.
2. Белозеров А. В., Бечер Ю., Булычева Ю. К., Замрий В. Н., Каюков А. С., Кобец В. В., Мешков И. Н., Минашкин В. Ф., Петров В. А., Пятаев В. Г., Седышев П. В., Скрыпник А. В., Сумбаев А. П., Уфимцев А. В., Шабратов В. Г., Швец В. А., Швецов В. Н., Фатеев А. А., Беликов О. В., Гальт А. А., Логачев П. В., Медведко А. С., Павлов В. М. Физический пуск первой очереди установки ИРЕН // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7. С. 923–932.

11.3.3. Анализ космического вещества (КВ) — космической пыли и метеоритов — с помощью рентгеновского и нейтронного рассеяния — И. А. Бобриков.

Методы анализа: нейтронная и рентгеновская дифракция, нейтронная и рентгеновская томография, нейтронное малоугловое рассеяние.

1) Фазовый анализ космического вещества с помощью дифракционных методов.

Сюда входит как рентгеновская, так и нейтронная порошковая дифракция. Оба метода взаимно дополняют друг друга. Метод рентгеновской дифракции является общепризнанным и широко распространенным инструментом для фазового анализа. Однако он имеет недостатки из-за особенностей взаимодействия рентгеновского излучения с веществом: малую чувствительность для легких элементов, плохую контрастность для соседних элементов периодической таблицы Менделеева [1]. Кроме того, рентгеновское излучение проникает сравнительно неглубоко в исследуемые объекты, что может иметь значение при исследовании космического вещества, в особенности метеороидов. Рентгеновское излучение высокой интенсивности может приводить к необратимым изменениям в образце, если в нем присутствует органическая составляющая. Нейтроны глубоко проникают в вещество, не разрушая его. Нейтроны чувствительны как к тяжелым, так и к легким элементам. При этом два соседних элемента из периодической таблицы обычно легко отделяются друг от друга, так как они имеют разные длины рассеяния нейтронов. Также нейтроны чувствительны к изотопическому составу исследуемого объекта. Недостатком нейтронной дифракции являются повышенные требования к количеству исследуемого вещества. Однако если исследуемый объект рассеивает нейтроны хорошо, то его минимальный объем для нейтронного дифракционного эксперимента в низком разрешении может быть $0,05 \text{ см}^3$ (при плотности 5 г/см^3). С помощью нейтронной дифракции также можно определять фазовый состав исследуемого вещества, а в некоторых случаях даже уточнять элементный и изотопный состав. Метод позволяет увидеть наличие кристаллизованной органической составляющей. Как с помощью рентгеновской, так и с помощью нейтронной дифракции можно проводить тесты на идентичность космического вещества, собранного в различных местах,

по типу и количеству присутствующих в нем кристаллических соединений и, таким образом, выяснять, принадлежат ли они одному разрушенному метеориту и т. п.

В ЛНФ ОИЯИ на реакторе ИБР-2 в настоящее время работают пять нейтронных дифрактометров, один из которых — ФДВР (фурье-дифрактометр высокого разрешения) идеально подходит для решения предстоящих задач [2]. Кроме высокого потока нейтронов на образце ($5 \cdot 10^6$ см⁻²/с), сверхвысокого разрешения, необходимого для качественного фазового анализа, большого выбора оборудования для создания специальных условий на образце, он обладает позиционно-чувствительным детектором, позволяющим отслеживать рефлексы от возможных органических длиннопериодических структур. В ЛНФ ОИЯИ имеется также модернизированный рентгеновский дифрактометр ДРОН-2. Кроме того, в ЛНФ развито тесное сотрудничество с другими исследовательскими российскими и зарубежными организациями, обладающими дорогостоящим, прецизионным экспериментальным оборудованием, например, НИЦ «Курчатовский институт» (Москва) — синхротронный источник рентгеновского излучения; ИЯФ (Москва) — современные рентгеновские дифрактометры фирмы Bruker; PSI (Швейцария) — источник нейтронов SINQ, синхротронный источник рентгеновского излучения SLS.

2) Нейтронная и рентгеновская радиография/томография.

В нейтронной и рентгеновской радиографии регистрируют с помощью специальной камеры прошедшее через объект излучение, что позволяет получить детальное изображение внутреннего строения макрообъекта, не разрушая его. Особо эффективны для этого метода нейтроны [2]. Особенности их взаимодействия с веществом позволяют получить высококонтрастные изображения внутреннего строения объектов в пределах 1–100 мм в диаметре с разрешением 50 мкм. Если сделать снимки в нескольких определенных проекциях, то можно построить 3D-модель внутреннего содержимого исследуемого объекта (томография). Появляется возможность получить изображения содержимого метеоритов, не разрушая их. Метод позволяет также исследовать так называемую метеоритную пыль (по Кринову) с размерами частиц более 100 мкм.

Такие данные могут быть чрезвычайно важны для понимания процесса формирования исследуемого объекта, а также для того, чтобы быстро характеризовать исследуемые образцы по макроструктуре.

В ЛНФ ОИЯИ имеется необходимое оборудование для проведения подобного рода исследований. В настоящее время под нейтронную радиографию выделен канал № 14 на реакторе ИБР-2. Кроме того, налажено тесное сотрудничество с радиографическими центрами в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва) и PSI (Швейцария).

3) Малоугловое нейтронное рассеяние.

Это упругое рассеяние нейтронов (или фотонов), размеры которых существенно превышают длину волны излучения, на неоднородностях вещества [3]. В этом случае рассеянные частицы отклоняются на малые углы относительно своего начального направления. Нейтронное малоугловое

рассеяние позволяет исследовать размеры и формы различных неоднородностей в широком спектре объектов, как в кристаллических, так и в аморфных и жидких. Например, исследовать поры в материалах или растворенные частицы одного вещества в другом. Последнее может использоваться при исследовании космической пыли в различных растворах.

На нейтронной станции ЮМО, расположенной на реакторе ИБР-2 в Дубне, можно исследовать объекты с размерами от 10 до 10000 Å.

Список литературы

1. Балагуров А. М. Нейтронография: задачи и способы решения // Природа. 2012. Т. 7. С. 14–25.
2. Anderson I. S. et al. Neutron Imaging and Applications. Springer pub., 2009.
3. Авдеев М. В., Аксенов В. Л. Малоугловое рассеяние нейтронов в структурных исследованиях магнитных жидкостей // УФН. 2010. Т. 180. С. 1009–1034.

11.4. Исследование космической пыли методами нанотехнологий

Е. М. Егорова

НИИ общей патологии и патофизиологии РАМН, Москва

Методы нанотехнологий позволяют производить исследование растворов частиц, содержащих частицы разного размера и разной природы, в том числе частицы космической пыли. С нашей точки зрения, наибольший интерес представляют наночастицы металлов, если таковые будут обнаружены.

Как известно, космическая пыль делится на две основных категории — межзвездная пыль и межпланетная пыль. Межзвездная пыль включает частицы размером менее микрона, в том числе частицы размером порядка сотых долей микрона или десятков нанометров. Межпланетная пыль содержит в основном более крупные частицы — от нескольких микрон до нескольких сантиметров. Тем не менее, как установлено в исследованиях, проводившихся в околоземном пространстве и в верхней атмосфере Земли, в межпланетной пыли присутствуют также частицы межзвездного вещества, предположительно вследствие захвата межзвездной пыли при прохождении Солнечной системы через газопылевые облака ([1, с. 124], сведения приведены в [2, с. 45]). Отсюда следует, что в космической пыли, выпадающей на Землю, могут содержаться частицы межзвездной пыли ([2, с. 45]) с размерами в нанометровом диапазоне (1–100 нм). Поэтому для развития исследований размеров, структуры и свойств частиц космической пыли в образцах, добытых с поверхности Земли, целесообразно привлекать методы, успешно применяемые в настоящее время для изучения свойств наноструктурных частиц.

Как было показано нами ранее [3], в частности, здесь могут быть полезны методы, используемые нашей лабораторией (лаборатория отдела

перспективных разработок ООО НПК «Наномет», НИИ общей патологии и патофизиологии РАМН) для исследований наночастиц металлов в растворах. Сюда входят методы определения размеров частиц и их распределения по размерам (фотонная корреляционная спектроскопия и просвечивающая электронная микроскопия), структуры частиц (дифракция электронов и рентгеноструктурный анализ), а также метод спектрофотометрии, позволяющий контролировать процесс синтеза наночастиц, определять их время жизни (стабильность), действие различных факторов на их оптические характеристики, агрегацию и адсорбционные свойства (см., например, [4]).

Во втором полугодии 2011 г. сотрудниками нашей лаборатории было проведено исследование образцов растворов, предоставленных астрокосмическим центром ФИАН и ГАИШ, с целью выявления пылевой компоненты с размерами частиц в интервале 1–6000 нм. При обнаружении частиц с размерами в пределах нанометрового диапазона предполагалось также выяснить, присутствуют ли среди таких частиц наночастицы металлов, которые можно идентифицировать по наличию соответствующих полос в спектрах оптического поглощения (см. также [3]).

Работа проводилась со следующими образцами:

образец № 1 — водный раствор, полученный из снегового покрова Эльбруса:

1а — исходный образец (талый снег),

1б — инфильтрат (вода из талого снега, пропущенная через фильтр);

образец № 2 — наносный грунт из-под ледника горной вершины Алтая.

Помимо спектрофотометрии и фотонной корреляционной спектроскопии (ФКС), в исследовании этих образцов использовали также методы потенциометрии (определение концентраций ионов H^+ , Na^+ , $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, Ag^+) и кондуктометрии (измерение электропроводности растворов). Марки соответствующих приборов и их производители приведены в техническом задании, в соответствии с которым проводились исследования.

Результаты нашей работы показали [5], что в предоставленных образцах наночастицы отсутствуют. При этом в образце № 1 не обнаружено каких-либо частиц во всем исследованном диапазоне размеров (1–6000 нм), а в образце № 2 (в водных экстрактах) обнаружены частицы размером 0,2–4 мкм; судя по спектрам поглощения таких растворов, это могут быть частицы органической природы (белки или белок-липидные комплексы).

Полученные данные указывают, прежде всего, на необходимость более основательной подготовки образцов растворов для исследования. *Во-первых*, отсутствие частиц в талой воде может быть обусловлено слишком малой концентрацией вещества; поэтому для образцов типа образца № 1 необходимо предварительно увеличить концентрацию вещества в растворе. Это означает, что для анализа растворы должны предоставляться в таких количествах, которые после их концентрирования (например, путем выпаривания) позволяют получить объемы, достаточные для исследования разными методами. *Во-вторых*, из образцов типа образца № 2 необходимо предварительно удалить компоненты явно земного происхождения, кото-

рые препятствуют обнаружению частиц космической пыли, в том числе наночастиц металлов. Так, в спектрах неводных экстрактов образца № 2 были обнаружены полосы поглощения, близкие к таковым для наночастиц некоторых металлов; поскольку, по данным ФКС, частицы в таких растворах не обнаруживались, найденные полосы поглощения могли быть обусловлены присутствием органических молекул (подробнее см. [5]). Для удаления таких мешающих компонентов следует вначале провести химический анализ образца методами аналитической химии (поставленными в соответствующих специализированных лабораториях), что позволит идентифицировать компоненты вещества, присутствующего в растворе. Далее можно химически осадить или разложить те из них, которые мешают определению частиц космической пыли.

Важно также, на наш взгляд, привлекать дополнительные приборы и оборудование, позволяющие: 1) удалять из раствора частицы микронных размеров для выявления наноразмерных частиц методом ФКС, 2) определять дополнительные характеристики наноразмерных частиц, прежде всего их форму и поверхностный заряд и 3) расширить число сортов ионов, определяемых в растворе методом потенциометрии.

Удаление частиц микронных размеров важно по той причине, что при определении размеров частиц методом ФКС (или динамического светорассеяния) возможность обнаружить присутствие малых частиц существенно зависит от того, присутствуют ли одновременно в растворе частицы большего размера. Это связано с тем, что определение размеров частиц здесь проводится на основании анализа спектра мощности флуктуаций интенсивности рассеянного света (в результате облучения образца лазерным лучом). Известно, что интенсивность светорассеяния пропорциональна r^6 , где r — радиус частицы. Поэтому при большом различии размеров частиц даже небольшая примесь частиц большего размера полностью маскирует присутствие малых частиц. В частности, при наличии небольшого количества частиц микронных размеров невозможно обнаружить присутствие наноразмерных частиц, даже если их численный вклад существенно более значителен. Удаление микронных частиц можно осуществить путем центрифугирования образцов раствора. Для этого можно использовать настольную центрифугу (6–8 тыс. об./мин, цена 30–40 тыс. руб.).

Определение формы и поверхностного заряда наноразмерных частиц возможно методом ФКС при наличии прибора, позволяющего регистрировать светорассеяние образца под разными углами, а также измерять электрофоретическую подвижность частиц при наложении постоянного электрического поля. По нашим сведениям, наиболее приемлемы для этой цели анализаторы размеров частиц и дзета-потенциала, производимые фирмой «Brookhaven» (США). Стоимость таких приборов варьирует от 2,5 до 3 млн руб, в зависимости от комплектации.

Следует добавить, что правильное определение заряда малых частиц из измерений электрофоретической подвижности невозможно без использования уравнений теории электрофореза, учитывающих вклад поверхностной проводимости и поляризации двойного электрического слоя вблизи

поверхности частицы (т. н. эффект релаксации, подробнее см., напр., [6]). Между тем, насколько нам известно, в анализаторах дзета-потенциала эффект релаксации либо вообще не учитывается, либо учитывается путем введения упрощенных выражений, что приводит к неточностям в определении заряда, которые (при больших зарядах и диаметре частиц менее 0,05 мкм) могут быть весьма значительными. В нашем распоряжении имеется оригинальная программа, в которой используются точные выражения, связывающие электрофоретическую подвижность и дзета-потенциал, позволяющая правильно рассчитывать поверхностный заряд малых частиц. С использованием этой программы ранее нами были определены правильные значения дзета-потенциала отрицательно заряженных липосом малого размера [7]. Таким образом, у нас имеется уникальная возможность определить реальные значения поверхностного заряда, что может быть важно для исследований малых частиц космической пыли, особенно для частиц с размерами порядка сотых долей микрона.

Расширение числа сортов ионов, определяемых методом потенциометрии, может быть полезно для получения дополнительных сведений о составе частиц космической пыли, присутствующих в растворе и способных вступать в химические взаимодействия с образованием свободных ионов. Подвергая исследуемый образец раствора действию химических реагентов и определяя затем вид и концентрацию образующихся ионов, можно высказать предположения о составе исходных частиц. Здесь могут быть интересны прежде всего ионы металлов, которые присутствуют в частицах космической пыли в виде оксидов (железо, никель, алюминий и др.). Полученные таким способом сведения о составе частиц можно рассматривать как дополнения к результатам определения состава методами аналитической химии. Для определения ионов названных выше (или других) металлов необходимо приобрести соответствующие ионоселективные электроды.

Используя имеющиеся в нашем распоряжении в настоящее время, а также дополнительные приборы и оборудование, названные выше, можно проводить исследования образцов водных растворов, полученных с горных вершин, из льдов Арктики и Антарктики. При этом возможно решать следующие задачи:

1. Выявление присутствия в растворе частиц космической пыли различной природы, определение их формы, распределения по размерам и поверхностного заряда методом ФКС. Определение размеров частиц возможно в интервале 1 нм – 6 мкм; определение заряда (для прибора производства «Brookhaven» марки VI-ZetaPlus) — в интервале размеров частиц от 10 нм до 30 мкм.

2. Детализация результатов измерений размеров и заряда частиц — разделение полного набора частиц на фракции путем центрифугирования. Определение формы, среднего размера и поверхностного заряда отдельных фракций.

3. Получение видимых изображений (электронных микрофотографий) частиц (в том числе отдельных фракций) методом просвечивающей электронной микроскопии.

4. Определение структуры частиц, присутствующих в растворе (аморфная или кристаллическая, в последнем случае определение типа решетки) с использованием дифракции электронов и рентгеноструктурного анализа. По результатам анализа структуры можно высказать предположения о составе частиц.

5. Исследование образцов растворов (как исходных, так и после разделения частиц на фракции) методом спектрофотометрии. Выявление полос поглощения в диапазоне 200–900 нм. Сопоставление спектров поглощения с данными анализа методом ФКС позволяет определить, присутствуют ли в растворе наночастицы металлов с характерными полосами поглощения в УФ-видимой области.

6. Исследование образцов растворов методом потенциометрии. Определение концентраций ионов металлов в исходных образцах и после воздействия химических реагентов для получения сведений о составе частиц, присутствующих в исходном растворе.

Список литературы

1. Кометы и происхождение жизни. М.: Мир, 1984.
2. Гиндилис Л. М., Власова Е. С. Космическая пыль как астрономический фактор // Космическая пыль на Земле. Миасс, 2010. С. 33–53.
3. Егорова Е. М. Возможности методов исследования наночастиц металлов для изучения космической пыли // Там же. С. 146–154.
4. Егорова Е. М. Автореф. дисс. . . . доктора хим. наук. М., 2011.
5. Отчет лаборатории отдела перспективных разработок ООО НПК «Наномет» о результатах исследований образцов космической пыли в природных образцах по заказу астрокосмического центра ФИАН. М., 2011.
6. Духин С. С., Дерягин Б. В. Электрофорез. М.: Наука, 1976.
7. Egorova E. M. Some Applications of the Dukhin Theory in Studies of Lipid Membranes // Colloids and Surfaces Ser. A (Physicochemical and Engineering Aspects). 2001. V. 192. P. 317–330.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

КОСМОГЕНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КП

В. Н. Снытников

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Солнце и другие звезды с планетами зародились в молекулярных облаках. В этих облаках при низких температурах 10–20 К идут туннельные и ион-молекулярные реакции. Их результатом являются CH_2O , CH_3OH и другие органические соединения, большое число которых обнаружено в облаках наземными радиотелескопами и телескопами космического базирования. Основная часть, до 99% вещества в облаках принадлежит H_2 и He, примерно по 76 и 23 мас.%. Доля органических соединений в общем составе вещества в облаках достигает 1 мас.%. Неорганические соединения составляют 1/10 от массы органики. Кислород — третий по распространенности элемент во Вселенной, что определяет изобилие в космосе молекул H_2O . Органические и неорганические соединения находятся там в виде пылинок размером в сотни нанометров. Пыль межзвездной среды может попадать в современную Солнечную систему.

В плотных (10^4 – 10^6 см⁻³) молекулярных облаках возникают условия для гравитационного сжатия среды. Вращающаяся среда коллапсирует в центральное тело, будущую звезду, и окружающий тонкий слой газа и пыли, околзвездный диск. Формирование диска происходит примерно за 100 тысяч лет.

Этот *первый начальный этап* заканчивается при массе центрального тела 0,08–0,1 от массы Солнца, когда в протозвезде зажигаются термоядерные реакции. Центральное тело является источником излучения, часть которого поглощается диском. Эта энергия поддерживает химические реакции в диске и его самоорганизацию. Диск около звезд солнечного типа существует миллионы лет. После первого начального этапа он проходит еще несколько этапов.

Второй этап, этап массивного диска, длится от несколько сот тысяч до миллиона лет. На этом этапе масса диска больше массы протозвезды или с ней сопоставима. В начале этапа диск продолжает набирать массу коллапсирующего газа. В конце этапа масса диска уменьшается из-за ухода газа на протозвезду и из-за рассеивания газа в окружающее пространство.

На третьем этапе, этапе неустойчивого диска, развиваются гравитационные двухфазные неустойчивости. В результате в диске появляются многокилометровые планетезимали и, возможно, зародыши планет.

Четвертый этап, этап среднемассивного диска, начинается, когда протозвезда набирает солнечную массу и превращается в звезду, а масса диска снижается примерно к 0,1 от массы звезды. Длительность этапа —

несколько миллионов лет. На этом этапе диск теряет значительную часть своей газовой компоненты.

Пятый этап, этап протопланетного диска, состоящего из газопылевой компоненты и роя планетезималей и зародышей планет, наступает, когда их масса начинает превышать массу распределенного по диску газа. Он длится десятки миллионов лет и заканчивается формированием планет.

Сжатие газа в диск на *первом и втором этапах* ведет к повышению температуры газа и концентрации пылинок. Такая среда с активными органическими соединениями и с наночастицами из элементов, среди которых главные по распространенности O, Mg, Si и Fe, благоприятна для синтеза оливина $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ и серпентина $(\text{Mg,Fe})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ — главных минералов углистых хондритов — других слоистых силикатов, глин структуры монтмориллонита. Вода в этом синтезе играет роль катализатора. Сами слоистые силикаты известны как эффективные катализаторы органических синтезов. Катализаторами в органических синтезах выступают и металлорганические соединения, и сами органические соединения. Можно сказать, что в условиях околозвездного диска природа проверила каталитическую активность космической пыли наночастиц не просто всех элементов, а каждого атома всех элементов! Итак, в диске на втором этапе *астрокатализа* шел каталитический синтез органических соединений и самих катализаторов. Вязкий органический конденсат, связывающий вместе неорганическую компоненту, легко дорастает до тел метровых размеров. Сеть химических реакций между всеми соединениями представляла собой тот допланетный хемоценоз, в котором происходил отбор автокатализаторов по их активности.

Начальное сжатие газа в диск сменяется на втором этапе его разлетом. Низкомолекулярные и малоактивные соединения, такие как метан, уносятся из диска вместе с газом. Но выросшие тела из собранного вещества остаются и образуют тонкий субдиск. В субдиске идет отбор в сторону получения и сохранения на телах высокомолекулярных соединений.

На *третьем этапе* в субдиске, в неустойчивой динамике среды, возникли многочисленные крупномасштабные сгустки из большей массы газа и множества тел. Давление газа в самом сгустке могло превышать на порядки давление газа вне его и достигать десятков атмосфер. Температура внутри сгустка из-за высокой теплопроводности водорода и гелия не отличалась от окружающей температуры диска. Тела в движении вокруг протозвезды входили и выходили из сгустка. При этом на телах происходили десорбция и адсорбция веществ, в том числе воды. Периодически поверхности тел в сгустках увлажнялись, а вне сгустков — осушались. Сгустки обменивались телами между собой. Эти условия были максимально благоприятны для синтеза предбиологических соединений «*мира РНК*». Гравитационное схлопывание отдельного сгустка приводило к объединению множества метровых тел в одно тело с общей массой газа. В диске появлялись километровые и бóльшие по размеру планетезимали вплоть до, возможно, зародышей планет. К концу третьего этапа протозвезда наби-

рает свою массу и становится молодой звездой с повышенной светимостью. По завершении этого этапа диск становится среднemasсивным.

Предбиологическая химическая эволюция заканчивается на третьем этапе «*миром РНК*» в околосреднем диске. Сведения об этом этапе содержат длиннопериодические кометы. Однако в оценке этих сведений нужно учитывать изменения, которые происходили с кометами за последующие миллиарды лет.

На *четвертом этапе* под воздействием излучения звезды и звездного ветра среднemasсивный диск продолжает терять свою газовую компоненту. Давление газа в диске снижается, а температура газа увеличивается. Усиливается деструкция органических соединений и другие фотопроцессы на поверхности планетезималей. В глубине тел при их сжатии температура повышалась, и высокомолекулярные органические соединения внутри тел подвергались разложению. В этих условиях перспективу сохраниться имели те соединения на поверхности тел, которые изолировались полимерной оболочкой. Весь биохимический процесс и его детали малопонятны, но это и есть стадия зарождения клетки. Появившись под воздействием солнечного излучения клетки захватывали в своем размножении основную часть доступных органических соединений и формировали свои первичные сообщества для получения пищи. Возникла *допланетная биосфера*, распространившаяся от пояса астероидов или Юпитера до Венеры. Длительность четвертого этапа — несколько миллионов, возможно, десятков миллионов лет. Свидетельства этого этапа — микрофоссилии бактерий в метеоритах, в частности, в углистых хондритах, дополняемые изотопными данными. Подобные среднemasсивные диски наблюдаются в местах образования звезд.

На *пятом этапе* в протопланетном диске идет окончательное формирование планет при укрупнении их зародышей в столкновениях с телами в рое. Оно проходит за десятки миллионов лет. Столкновения тел переходят затем в бомбардировку поверхности формирующихся планет. Для Земли этот процесс длится еще примерно 600 млн лет. Бомбардировка заканчивается, в основном, к 3,9 млрд лет тому назад. Но метеориты, другие тела и космическая пыль до сих пор продолжают попадать на планеты. Относительно редко случаются отдельные катастрофические столкновения. В бомбардировке и в столкновениях тел при воздействии Солнца органические вещества разрушаются. Представители биосферы гибнут. Масса органического, пребиотического и биотического вещества уменьшается с образованием CO_2 , N_2 , CH_4 и H_2O . В этих жестких неблагоприятных условиях выжили те микроорганизмы, которые смогли сформировать биоценозы, адаптирующиеся к изменяющимся внешним условиям. Пятый этап *депрессивной биосферы* заканчивается для Земли «*планетой бактерий*» к 3,9 млрд лет тому назад. С этого времени начинается геологически документированная история Земли с появлением гидросферы и со связыванием атмосферного CO_2 в геохимическом цикле, с появлением осадочных пород и с синтезом кислорода в бактериальных биоценозах. Этот же этап при исчезновении жидкой воды заканчивается для Марса и Венеры деструк-

цией всего биоорганического и органического вещества, по крайней мере, на поверхности этих планет и становлением их углекислотной атмосферы.

Таким образом, в современной Солнечной системе межпланетная пыль прошла длинный путь своей эволюции. Пыль несет запись процессов в Солнечной системе и представляет собой интереснейший объект для комплексного междисциплинарного изучения.

Приложение 2

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ ВНЕЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ (УЧЕБНЫЙ ОБЗОР)

В. И. Гроховский, Д. Г. Патрушева

Уральский федеральный университет (УрФУ), Екатеринбург

Размеры пылевых частиц внеземного происхождения, как правило, не превышают 1 мм. Так, размеры большинства частиц кометного происхождения, собранных в стратосфере, а также обнаруженных в аэрогельных ловушках космического зонда Stardust, находятся в микронном и субмикронном диапазонах. Подобные размеры пылевых частиц установлены и по данным астрофизических исследований для протопланетных облаков, а также для мелкодисперсной фракции лунного грунта, доставленного на Землю АМС «Луна» и КК «Apollo». Более того, размеры находок досолнечных минеральных зерен в матрице примитивных хондритов не превышают нескольких микрон.

Задача диагностики и установления космической природы пылевых частиц, собранных на поверхности Земли, сводится к нахождению отличительных признаков в строении, химическом и изотопном составе и тоже решается на локальном уровне. В последние годы наблюдается бурное развитие новых возможностей в изучении состава, структуры и свойств микроколичеств минералов и материалов. Это обусловлено, с одной стороны, плодотворным внедрением компьютерных технологий в процесс получения и обработки аналитических данных, а с другой — повышенным интересом к исследованиям вещества на наноуровне.

В обзоре демонстрируются возможности и достижения методов, основанных на использовании электронных, ионных, ядерных и механических зондов для исследования микрообъектов земного и внеземного происхождения, таких как

— растровая электронная микроскопия на просвет и на отражение SEM, TEM, STEM, ФЕВ-ТЕМ;

— электронно-зондовый микроанализ с использованием волновых WDX- и энергодисперсионных EDX-спектрометров рентгеновского излучения;

— дифракция обратно отраженных электронов ДОЭ/EBSD;

- контактные и бесконтактные моды сканирующей зондовой микроскопии СЗМ/SPM;
- лазерная конфокальная сканирующая микроскопия;
- масс-спектрометрия вторичных ионов SIMS с микро- и нанопро-
странственным разрешением;
- рентгеновская томография субмикроскопических объектов;
- дифракция рентгеновских лучей с использованием синхротронного
излучения и по методу Гандольфи.

Наиболее часто применяемым, дешевым и доступным методом получения структурной информации является *оптическая микроскопия*. Поскольку микрообъекты космического происхождения в основном непрозрачны, для их исследования используют микроскопы отраженного света (металлографические микроскопы), где в качестве образцов служат шлифы. Существуют различные методы их приготовления. Для микрообъектов обязательным является помещение частиц в какой-либо компаунд, позволяющий выполнение последующих механических операций — шлифовку и полировку. При исследовании частиц лунного грунта, доставленных АМС «Луна» и КК «Apollo», в качестве компаунда успешно применялись прозрачные эпоксидные смолы, акриловые и органические пластмассы. Например, самая крупная металлическая частица, доставленная с поверхности Луны, после заливки пластмассой «Норакрил» в нашей лаборатории была дополнительно разрезана тонким алмазным диском на шесть частей (рис. 1).

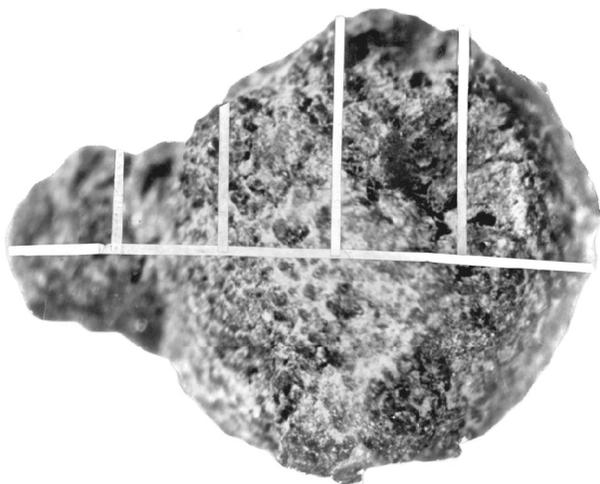


Рис. 1. Схема разрезания крупной металлической частицы, доставленной АМС «Луна-20», при приготовлении металлографических шлифов. Максимальный размер частицы 60 мм

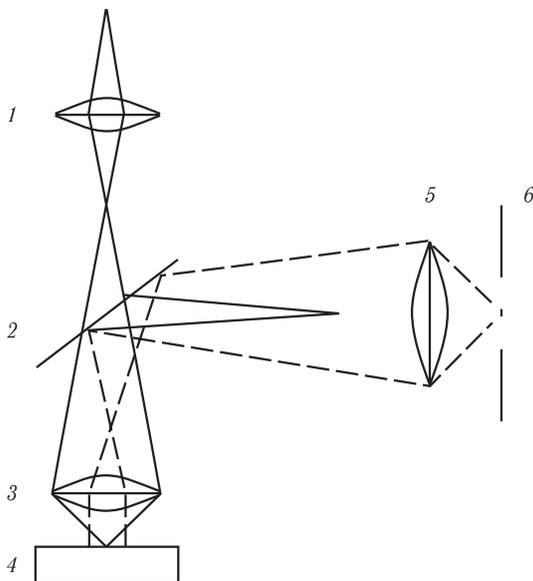


Рис. 2. Схема оптического микроскопа отраженного света: 1 — окуляр; 2 — полупрозрачное зеркало; 3 — объектив; 4 — образец; 5 — конденсор; 6 — апертурная диафрагма конденсора

Базовая конструкция оптического микроскопа на отражение (рис. 2) позволяет дополнительно использовать специализированные модули для работы в режимах темного поля, поляризации, флуоресценции, интерференции, фазового контраста и др. Однако максимальная разрешающая способность металлографического микроскопа равна 0,3 мкм (0,2 мкм с иммерсией). По сути дела это и есть граница между микро- и наноуровнями изучения структуры.

Определенный прогресс в получении данных методами оптической микроскопии достигнут благодаря интенсивному развитию компьютерных технологий. Прежде всего, это относится к компьютерному управлению работой светового микроскопа и к получению, обработке и анализу основного носителя информации в микроскопии — изображения структуры в цифровом виде.

Современные анализаторы изображения представляют собой достаточно емкие программные продукты, позволяющие выполнять с цифровым изображением несколько тысяч различных математических функций по его преобразованию, фильтрации, сегментации, распознаванию, а также получению стереографических и статистических параметров структуры. Оператору достаточно легко заблудиться в этом обилии функций, поэтому большинство разработчиков идет по пути создания анализаторов для решения узкоспециализированных задач микроскопии. Следует отметить оригинальные разработки анализаторов изображений фирмы SIAMS,

построенных на базе электронных таблиц SIMAGIS, что значительно облегчает оператору создание собственных компьютерных решений в анализе изображений структуры.

В ряде программ анализа изображений присутствует функция «сшивка изображения», причем эта операция возможна как в плоскости шлифа ($X-Y$), так и в направлении Z . Это дает возможность не только создавать панорамные снимки объектов, но и получать качественные резкие изображения при больших увеличениях с рельефных шлифов. Пример такой «сшивки изображений» представлен на рис. 3, где резкая картина получена с травленного метеорита, когда фосфидная фаза сильно выступает из камаситной матрицы. В структуре наблюдается пластина рабдита $(Fe,Ni)_3P$, деформированная линиями Неймана.

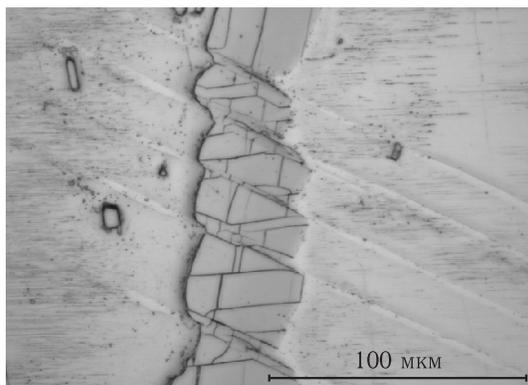


Рис. 3. Изображение поверхности шлифа грубого октаэдрита Сихотэ-Алинь после травления ниталем, полученное сшивкой трех картин с различной наводкой на резкость

Подобный принцип компьютерной стыковки изображений реализован в современных *конфокальных лазерных сканирующих микроскопах*. Конфокальная микроскопия является неразрушающим методом получения двумерных оптических сечений материала, позволяющим изучать 3D-топологию поверхности или внутреннюю структуру полупрозрачных образцов. Фактически, в приборе используется световой зонд. Отличие конфокального микроскопа (КМ) от «классического» оптического микроскопа в том, что в каждый момент времени регистрируется изображение одной точки объекта, а полноценное изображение строится путем сканирования. Режим сканирования может быть реализован перемещением конфокальной диафрагмы или предметного столика. Для того чтобы регистрировать свет только от одной точки, после объективной линзы располагается диафрагма малого размера таким образом, что свет, испускаемый анализируемой точкой, проходит через диафрагму и регистрируется, а свет от остальных точек в основном задерживается диафрагмой. В современных конфокальных

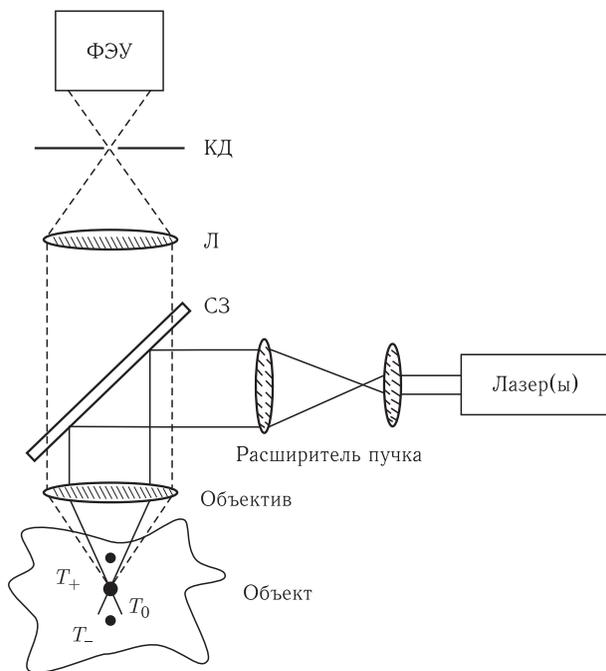


Рис. 4. Схема конфокального микроскопа: СЗ — селективное зеркало, Л — линза, КД — конфокальная диафрагма, ФЭУ — фотоэлектронный умножитель

микроскопах в качестве источника света используют лазер. Принципиальная схема конфокального микроскопа представлена на рис. 4.

Конфокальные микроскопы имеют два основных режима работы. В режиме отраженного света детектор регистрирует свет, длина волны которого совпадает с длиной волны лазерного излучения. Во флуоресцентном режиме регистрируется излучение с длиной волны больше, чем у возбуждающего лазерного света. Стоит отметить, что флуоресцентный сигнал намного слабее отраженного света. КМ изучает поверхности от 5 до 200 мкм с высоким разрешением — 200 нм, а также особенности на глубине до нескольких миллиметров. Максимальная глубина определяется предельным рабочим расстоянием от поверхности объектива до находящегося в фокусе объекта. Эта величина близка к фокусному расстоянию объектива.

Главной особенностью конфокальной микроскопии и одновременно ее достоинством является высокое разрешение вдоль оптической оси. Смысл конфокального микроскопа — получение тонких оптических сечений. Однако возникают проблемы, ограничивающие «толщину» оптического среза и максимальную глубину, на которой он может быть получен. К факторам, ограничивающим толщину среза относятся: размер конфокальной

диафрагмы, показатели преломления и поглощения света в образце. Чем меньше диафрагма, тем ближе толщина сечения к теоретическому пределу, в то время как при больших апертурах исчезает возможность получать сечения. В то же время апертурное значение не может уменьшаться до слишком малых значений из-за явления дифракции и уменьшения сигнала, попадающего на детектор. Обычно размер диафрагмы варьируется от 1 до 18 мм. Достоинством метода является высокая чувствительность, а недостатком — медленное построение изображения. В конфокальной микроскопии обеспечивается высокая контрастность, что позволяет добиться разрешения объектов, имеющих разницу в интенсивности до 200:1.

Конфокальная микроскопия широко применяется в материаловедении для изучения ориентации и пространственного распределения волокон в полупрозрачных волокнистых композитах. Также она использовалась для выявления и изучения частиц космической пыли в аэрогеле миссии Stardust (рис. 5).

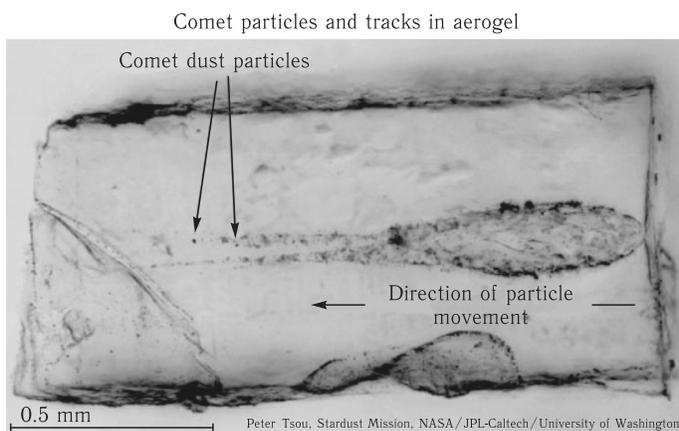


Рис. 5. Частицы космической пыли от кометы Wild2, собранной миссией Stardust

Преодолеть ограничения по разрешающей способности в микроскопии можно, если использовать излучение с меньшей длиной волны. Эта возможность позволяет создавать различные приборы с использованием электронов. Основной характеристикой электронов, которая определяет особенности их взаимодействия с веществом, является кинетическая энергия электронов (табл. 1). *Электронная микроскопия* — совокупность электронно-зондовых методов исследования микроструктуры твердых тел, их локального состава и микрополей (электрических, магнитных и др.). Различают два главных направления в электронной микроскопии: просвечивающую ПЭМ (иногда используют термин трансмиссионная электронная микроскопия — ТЕМ) и растровую РЭМ (в английской литературе SEM).

Таблица 1. Кинетическая энергия электронов

Энергия электронов	100 эВ	500 эВ	1 кэВ	100 кэВ	200 кэВ	400 кэВ	1,25 МэВ	Видимый свет, λ , Å 3400–7000
Длина волны λ , Å	1,226	0,548	0,38	0,037	0,0251	0,0164	0,00735	

В *просвечивающем электронном микроскопе* тонкопленочный объект просвечивается пучком ускоренных электронов. Электроны, отклоненные атомами объекта на малые углы и прошедшие сквозь него с небольшими энергетическими потерями, попадают в систему магнитных линз, которые формируют на люминесцентном экране (и на фотопленке) изображение внутренней структуры. Принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа приведена на рис. 6.

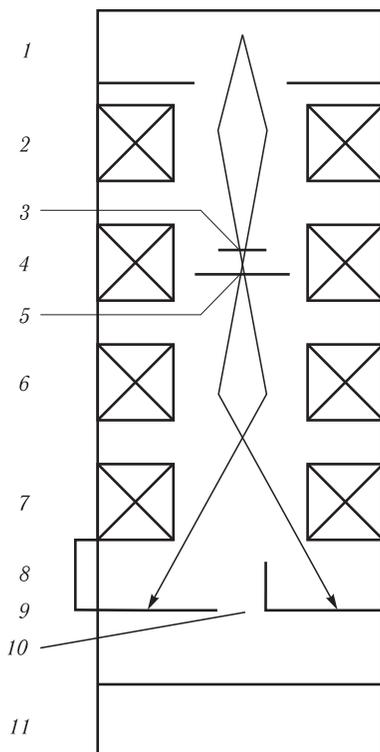
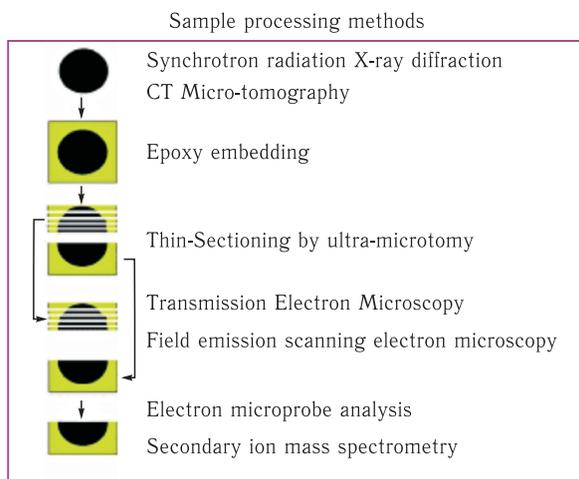


Рис. 6. Схема просвечивающего электронного микроскопа: 1 — электронная пушка; 2 — конденсор; 3 — образец; 4, 5 — объектив и его диафрагма; 6, 7 — промежуточная и проекционная линзы; 8 — смотровое окно; 9 — люминесцентный экран; 10 — фотокамера с затвором; 11 — вакуумная система

При прохождении электронов через образец одни из них рассеиваются из-за столкновений с ядрами атомов образца, другие — из-за столкновений с электронами атомов, а третьи проходят, не претерпевая рассеяния. Степень рассеяния в какой-либо области образца зависит от толщины образца в этой области, его плотности и средней атомной массы (числа нуклонов) в данной точке. Электроны, выходящие из диафрагмы с угловым отклонением, превышающим некоторый предел, уже не могут вернуться в пучок, несущий изображение, а поэтому сильно рассеивающие участки повышенной плотности, увеличенной толщины, места расположения тяжелых атомов выглядят на изображении как темные зоны на светлом фоне. Такое изображение называется светлопольным, поскольку на нем окружающее поле светлее объекта.

Разрешение и информативность ПЭМ-изображений во многом определяются характеристиками объекта и способом его подготовки. Важным этапом ПЭМ является подготовка образца. К методам получения тонких пленок относятся: механическая обработка, электрохимическое травление и ионное травление, метод реплик (подготовка отпечатков поверхности). Наиболее оптимальным вариантом для получения максимально возможной информации от микрочастиц в современных условиях можно считать схему, приведенную на рис. 7.

Одним из наиболее универсальных и перспективных приборов для исследования структуры на различных масштабных уровнях является *растровый электронный микроскоп*. По темпам развития и разнообразию



(From Nakamura *et al.*, (2008) Science, v. 321, fig. S1)

Рис. 7. Оптимальная схема последовательности разрезания малых частиц (10–40 мкм) космической пыли из аэрогеля Stardust на микротоме для исследования комплексом методов, включающих рентгеновскую дифракцию на синхротроне, рентгеновскую микротомографию, TEM, SEM и SIMS

приборов в последние годы РЭМ опережает ПЭМ. В растровых электронных микроскопах электронный луч, сжатый магнитными линзами в тонкий (1–10 нм) зонд, сканирует поверхность образца, формируя на ней растр из нескольких тысяч параллельных линий. Возникающие при электронной бомбардировке поверхности вторичные излучения (рис. 8) регистрируются различными детекторами и преобразуются в видеосигналы, модулирующие электронный луч на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Развертки лучей в колонне РЭМ и в ЭЛТ синхронны, поэтому на экране ЭЛТ появляется изображение, представляющее собой картину распределения интенсивности одного из вторичных излучений по сканируемой площади объекта в виде точечного растра.

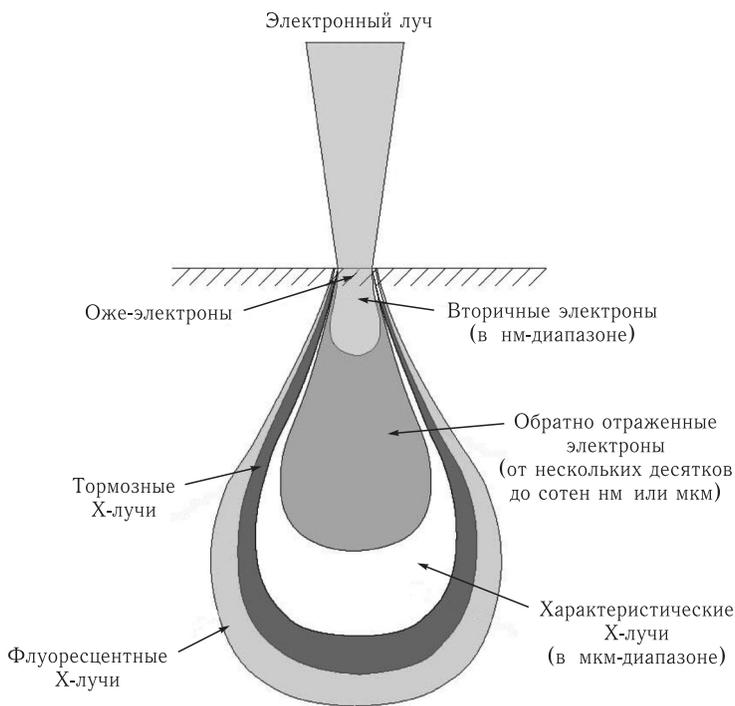


Рис. 8. Типы и области излучений, возникающих в образце при облучении электронами в РЭМ

Выбор регистрируемого вторичного излучения обусловлен задачей исследования. Обратные отраженные электроны позволяют с высокой эффективностью различать материал образца за счет зависимости коэффициента рассеивания от атомного номера. Возникновение фазового контраста при детектировании обратных отраженных электронов связано с зависимостью величины потери энергии электроном первичного пучка от атомного но-

мера химического элемента, с которым произошло столкновение. При наличии в образце неоднородности — например областей с тяжелыми элементами в общей легкой матрице — полученное изображение будет иметь четко ограниченные светлые участки, соответствующие тяжелым элементам. От тяжелых элементов электроны отражаются лучше, чем от легких.

Для определения топографии (рельефа) поверхности используют детектирование вторичных электронов, получаемых с менее глубоких слоев, чем отраженные электроны. Такую информацию возможно получать по причине того, что основным параметром, определяющим выход вторичных электронов, является угол падения пучка первичных электронов на поверхность мишени. Таким образом, вариации наклона микроучастков поверхности вызывают резко выраженные изменения в выходе вторичных электронов. С целью увеличения эмиссии вторичных электронов часто образец устанавливается под углом к оси зонда. При этом изображение характеризуется равномерным освещением образца, ярким окаймлением краев и хорошо выраженной топографией при малом выражении контраста (рис. 9).

Выделяют следующие преимущества РЭМ: высокая разрешающая способность; большая глубина фокуса; простота подготовки объектов исследования; высокая прицельность при смене масштаба исследования; возможность совмещения с локальными методами изучения химического состава и кристаллической структуры; формирующееся цифровое изображение можно использовать в компьютерной автоматизации обработки результатов.

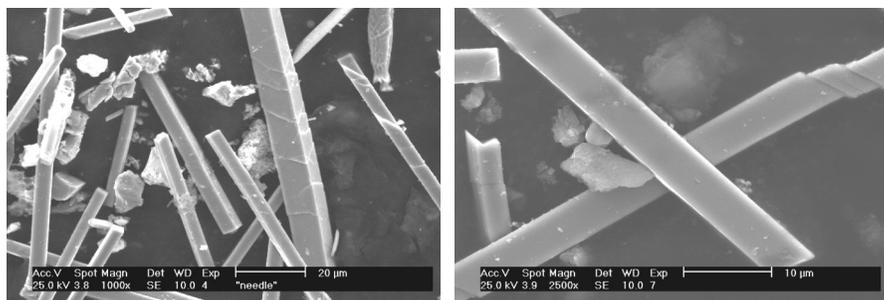


Рис. 9. Растровая электронная микроскопия выделенных стержневых фосфидов из метеорита Сихоте-Алинь. SEM Philips 30 XL

Растровые электронные микроскопы дают увеличения от $\times 5$ до $\times 200000$, хотя для РЭМ понятие «увеличение» условно, а реальное значение имеет разрешение. Под разрешающей способностью (разрешением) понимается наименьшее расстояние между двумя элементами микроструктуры, видимыми на изображении раздельно. Разрешающая способность РЭМ составляет около 100 \AA . Для изучения структуры

поверхности посредством РЭМ к образцу предъявляется требование электропроводности, чтобы исключить помехи за счет накопления поверхностного заряда при сканировании. В значительной степени качество получаемого изображения определяется параметрами электронного зонда (рис. 10).

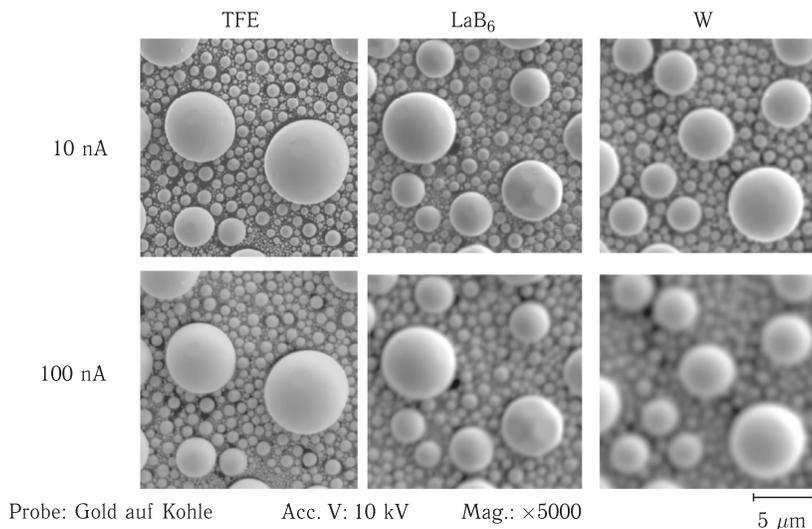


Рис. 10. Влияние типа катода и силы тока в электронном зонде на качество РЭМ-изображения

Размеры электронного пучка определяются также качеством электронной оптики и размерами острия катода. Если используется электронная пушка из тонкой вольфрамовой проволоки, пучок электронов создается за счет термоэмиссии. Электронные пушки с катодами из острозаточенного гексаборида тантала или с использованием полевого эмиттера имеют большую яркость и меньший размер катода, однако требуют для стабильной работы высокий и сверхвысокий вакуум.

Кроме получения изображения поверхности микрочастиц весьма важно получать данные о локальном химическом составе образца. За полвека существования метода *микрорентгеноспектрального анализа* устройства для его реализации стали неотъемлемой частью электронно-микроскопических приборов. В литературе встречаются термины «электронный микронзонд», «микроанализатор с электронным зондом», «электронный зонд», «электронно-зондовый микроанализ» и т.п. Во всех случаях речь идет о приборах, предназначенных для регистрации рентгеновских спектров с участков поверхности твердого тела диаметром 1–3 мкм. На практике регистрация спектров осуществляется кристалл-спектрометрами WDS либо энергодисперсионными детекторами EDX. Система регистрации характе-

ристического рентгеновского излучения в значительной степени определяет чувствительность метода. Волновой спектрометр измеряет длину волны характеристического рентгеновского излучения, а энергодисперсионный спектрометр регистрирует величину энергии рентгеновского излучения. Эти спектрометры взаимно дополняют друг друга (табл. 2), поэтому оптимальной ситуацией следует считать наличие их в одном приборе. Следует также отметить одну из проблем, возникающих при использовании EDX детектора, — наложение линий характеристического излучения по энергиям в пределах разрешающей способности детектора. Большие трудности в микроанализе проявляются, если содержание элементов, попадающих в такое перекрытие, незначительно. Вместе с тем эти проблемные места в спектрах хорошо известны, например наложение линий в EDX-детекторе для следующих групп элементов: Ni $L\alpha$ – La $M\alpha$; Zr $L\alpha$ – Pt $M\alpha$ – P $K\alpha$ – Ir $M\alpha$; Si $K\alpha$ – W $M\alpha$ – Ta $M\alpha$ – Rb $L\alpha$; Mn $L\alpha$ – Fe $L\alpha$ – F $K\alpha$; Y $L\alpha$ – Os $M\alpha$ и т. д.

Таблица 2. Сравнительная характеристика энергодисперсионного EDX- и волнового WDS-спектрометров

Характеристика	EDX	WDS
Получение данных	Одновременно по всем элементам	Последовательно
Диапазон анализируемых элементов	Be–U	Be–U
Разрешение линии Mn k_{α} , эВ	125	8
Предел обнаружения, ppm	~ 1000	10–100
Отношение сигнал/шум	30–100	100–1000
Точность результатов	Приемлемая	Хорошая
Скорость счета	100 000 на спектр	100 000 на элемент
Продолжительность анализа	Минуты	Минуты–часы
Аппаратурное исполнение	Простое	Сложное

Качественный микроанализ можно провести, выполнив съемку поверхности образца в поглощенных электронах или в характеристическом рентгеновском излучении интересующего элемента (рис. 11). О содержании элемента можно судить по яркости свечения на полученном изображении. Современные приборы оснащены компьютерами и позволяют с достаточно высокой точностью проводить количественный микроанализ при введении соответствующих поправок.

В последние годы широкую известность в аналитическом материаловедении приобрел метод *дифракции обратно отраженных электронов ДОЭ/EBSD* благодаря возможности быстрого локального кристаллографического анализа. Метод ДОЭ (известный также как дифракция Кикучи)

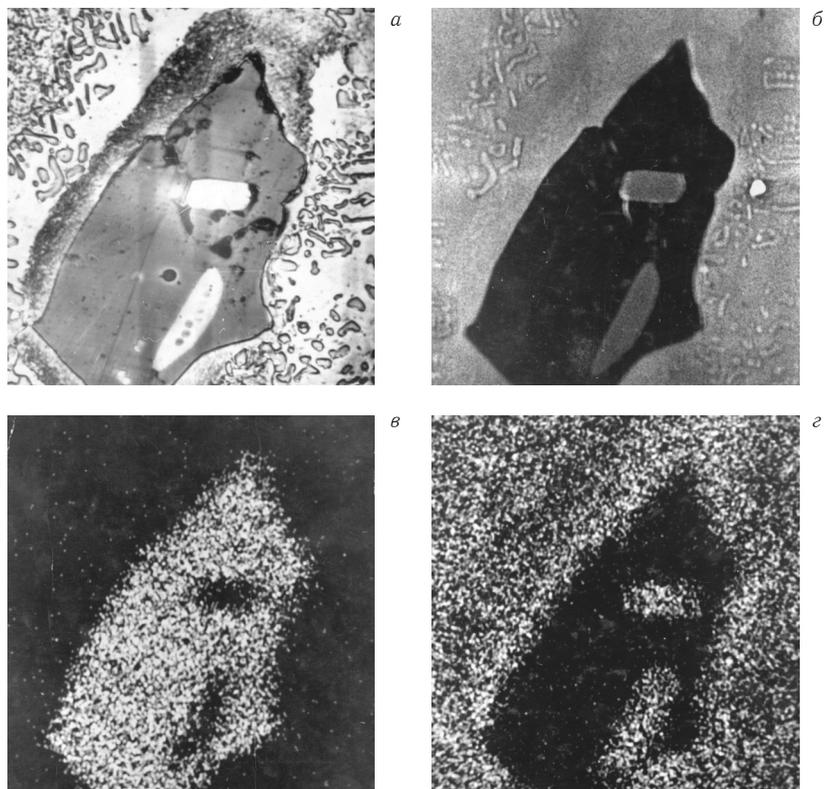


Рис. 11. Растровые картины с участка шлифа 100×100 мкм крупной металлической частицы 2004-016 (см. рис. 3), доставленной на Землю АМС «Луна-20». а) оптическое изображение; б) изображение в отраженных электронах; в) изображение в излучении $S k_{\alpha}$; г) изображение в излучении $P k_{\alpha}$. Микроанализатор CAMECA MS46, 1974 г.

был впервые разработан Аламом в 1954 г., когда он получил несколько дифракционных картин и назвал их «широкоугольные отраженные картины Кикучи» в знак признания соответствующего явления, описанного Кикучи в 1920-е гг. Однако эти исследования не развивались до начала XXI века, когда компьютерные технологии в обработке изображений открыли революционные возможности этого метода (рис. 12).

Метод позволяет проводить количественное исследование ориентации кристаллов, фазового состава, текстуры и границ зерен, а в комбинации с анализом локального химического состава его можно использовать для определения неизвестных фаз микро- и наноразмеров. Получение картин дифракции отраженных электронов с помощью растрового электронного микроскопа не составляет особого труда. Для этой цели полированный

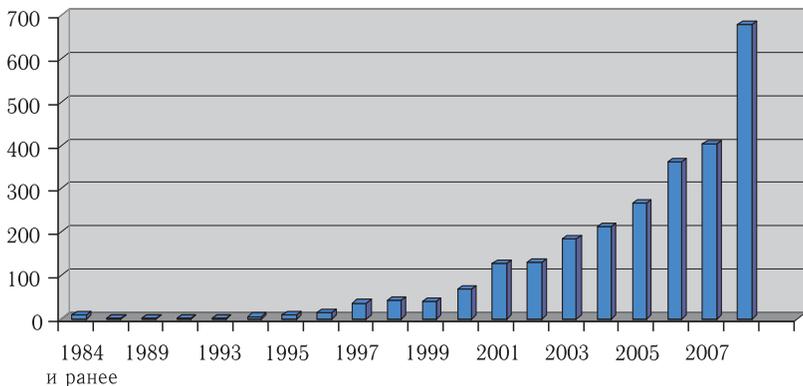


Рис. 12. Распределение числа публикаций (■) с использованием метода ДОЭ/EBSD по данным Science Direct по годам

образец наклоняют под углом около 70° к горизонтали. Электронный зонд направляют в интересующую точку на поверхности образца: упругое рассеяние падающего пучка создает точечный широко расходящийся пучок (геометрия 4π). В тех случаях, когда удовлетворяется условие дифракции Брэгга для атомных плоскостей решетки кристалла, образуются по два конусообразных пучка дифрагированных электронов для каждого семейства кристаллических плоскостей. Эти конусы электронов можно сделать видимыми, поместив на их пути фосфоресцирующий экран, а вслед за ним высокочувствительную камеру для регистрации (например, цифровую CCD-камеру). Там, где конусообразные пучки электронов пересекаются с фосфоресцентным экраном, они проявляются в виде тонких полос, называемых полосами Кикучи (рис. 13).

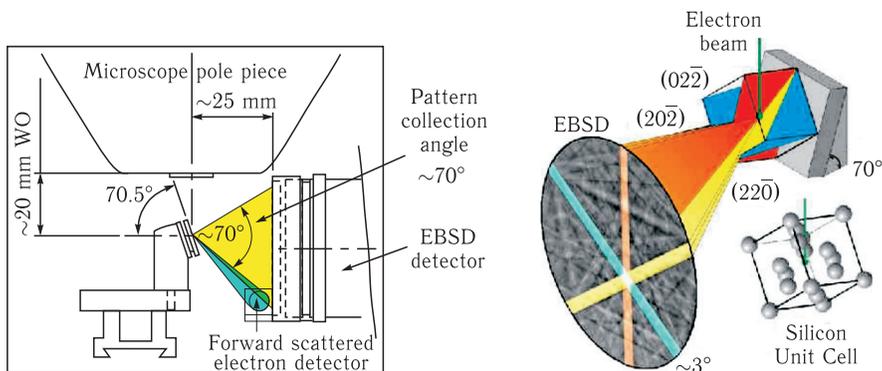


Рис. 13. Геометрия метода ДОЭ/EBSD и схема формирования полос Кикучи в растровом электронном микроскопе

Каждая из этих полос соответствует определенной группе кристаллографических плоскостей. Результирующие картины ДОЭ состоят из множества полос Кикучи. С помощью специальных компьютерных программ автоматически определяется положение каждой из полос Кикучи, производится сравнение с теоретическими данными о соответствующей кристаллической фазе и быстро вычисляется трехмерная кристаллографическая ориентация. Весь процесс от начала до конца занимает около 0,02 с. В настоящее время уже известны устройства, работающие с частотой 600 Гц.

Метод ДОЭ/EBSD широко используется для исследования структуры материалов, однако известны отдельные примеры применения его для идентификации фаз в собранных частицах космической пыли. Нами метод применялся для идентификации минерала роалдита в метеорите Сихотэ-Алинь, для определения ориентационных соотношений рабдита различной морфологии и роалдита в камаситной матрице, а также для установления природы полос селективного отражения (PCO), или «Schifrin bands», в высоконикелевых атакситах. Микроструктура атаксита Чинге в основном представлена мелкодисперсной смесью нескольких фаз (плесситом), неразличимой традиционными методами оптической микроскопии. Средний химический состав метеорита: 16,8 вес. % Ni, 0,5 вес. % Co, остальное Fe.

Полученные EBSD-карты фазового и ориентационного контрастов (рис. 14, 15) позволили выявить различный набор ориентировок камасита при переходе через границу PCO с преобладанием одной основной. В контрасте ориентации α -фазы (рис. 14) четко проявляется граница PCO. Для γ -фазы наблюдается значительная разориентация дисперсных выделений. Выявлен набор нескольких кристаллографических ориентировок как в PCO, так и вне нее, одна из них сохраняется при переходе границы

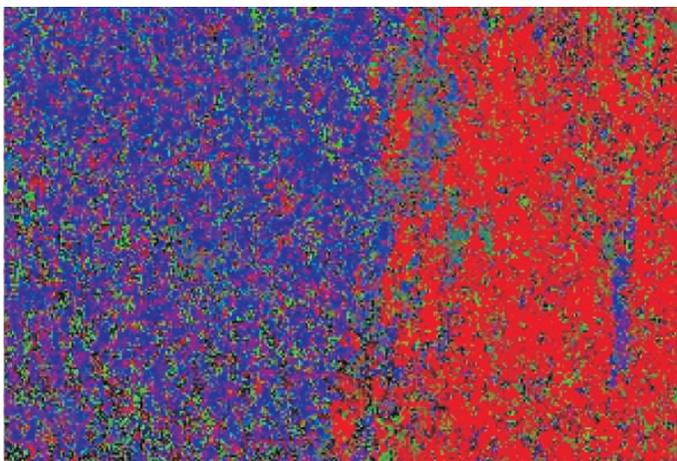


Рис. 14. Карта EBSD-ориентаций ОЦК Fe(Ni), размер пикселя 50 нм

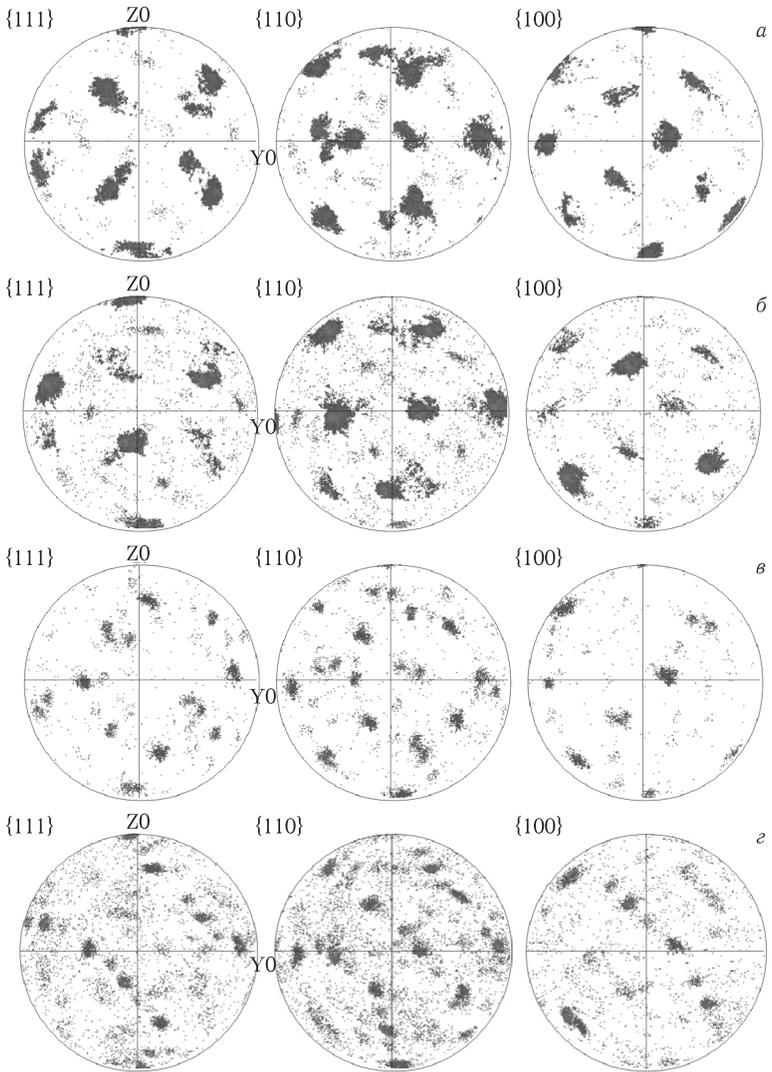
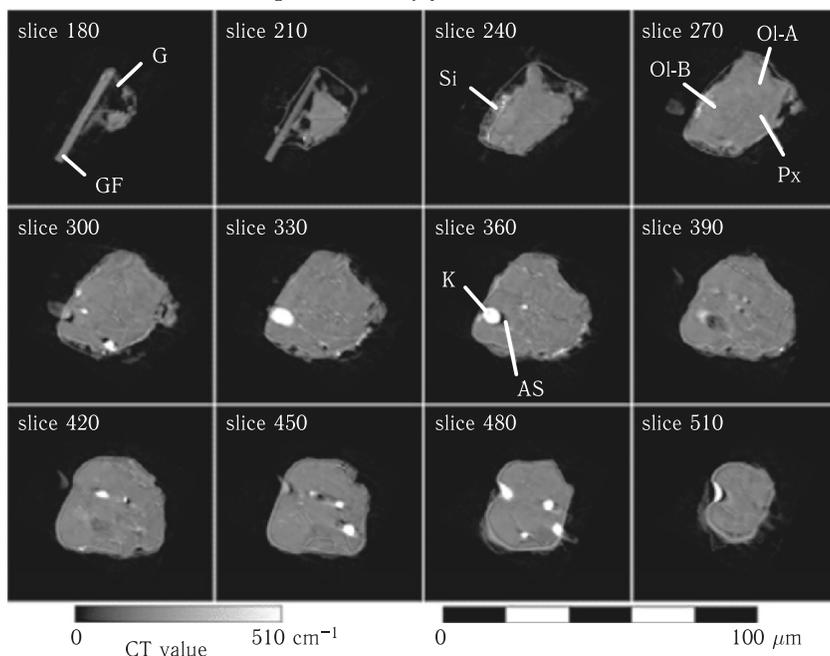


Рис. 15. Набор полюсных фигур, полученных методом EBSD с двух сторон ПСО: а) ориентация камасита в зоне 1 ПСО; б) ориентация камасита в зоне 2 ПСО; в) ориентация тэнита в зоне 1 ПСО; г) ориентация тэнита в зоне 2 ПСО

ПСО. Некоторые из этого набора имеют следующее соотношение с α -фазой: $\{111\}||\{1-10\}$, что соответствует соотношению Курдюмова–Закса. Это свидетельствует о том, что часть кристаллов γ -фазы образовались из α_2 -фазы, а другие кристаллографические ориентировки соответствуют остаточной γ -фазе, присутствующей в ПСО.

CT images of cometary particle "Gozen-Sama"



(From Nakamura *et al.*, (2008) Science, v. 321, fig. S2.)

Рис. 16. Последовательные томографические изображения частицы, названной Gozen-sama. G — клей, а GF — стеклянная нить, используемые для крепления частицы. Si — расплавленный аэрогель, Ol — оливин, Px — пироксен, K — камасит, AS — тень от зерна камасита

Достаточно перспективным методом исследования микрочастиц может оказаться *рентгеновская микротомография*. Здесь можно использовать и синхротронное излучение (рис. 16), и настольные рентгеновские микротомографы, обеспечивающие разрешение в несколько сотен нанометров. Более того, имеются разработки, позволяющие реализовать принцип рентгеновской микротомографии в растровом электронном микроскопе. В этом случае исследуемая частица помещается на некотором расстоянии от точечного источника рентгеновского излучения, которое возбуждается электронным зондом.

Принцип получения рентгенограмм проиллюстрирован на рис. 17. Повороты образца на определенные углы или применение нескольких детекторов для регистрации прошедшего через частицу излучения позволяют создать трехмерную модель объекта. При прохождении рентгеновских лучей через образец происходит их поглощение в соответствии с неоднородностью состава и плотности материала, что обеспечивает контраст изображения. Построенная компьютерная модель объекта позволяет изучать

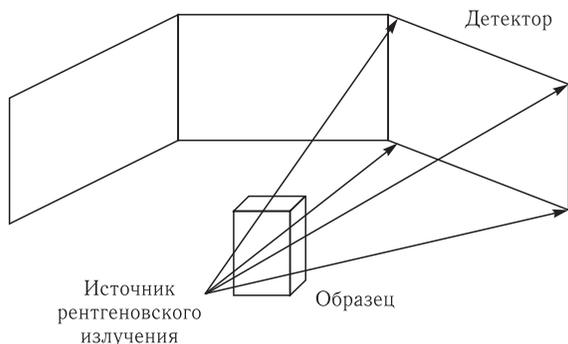


Рис. 17. Принцип получения изображения в рентгеновской микротомографии

объемное изображение микроскопических объектов, их пространственную структуру и получать количественные характеристики без разрушения образца.

В практике анализа геологических образцов очень быстро распространяется применение методов масс-спектропии вторичных ионов МСВИ/SIMS. В *ионном зонде* на образец направляется не пучок электронов (как в электронном микрозонде), а пучок отрицательно заряженных ионов. Источник ионов формирует ионный пучок, который развевается в растр на поверхности образца и распыляет материал с этой поверхности. Ионизированные компоненты распыленного вещества анализируются по массе, и результаты анализа отображаются в виде силы тока вторичного ионного пучка в зависимости от массы иона или двумерного изображения распределения вторичного пучка по массе ионов.

Существует три типа масс-анализаторов:

- четырехполюсный масс-анализатор. Имеет высокое массовое разрешение, но также ограничение по массе;
- магнитный анализатор;
- анализаторы, основанные на измерении времени пролета ионов до датчика. Такие анализаторы не имеют ограничения по массе и при этом характеризуются высоким разрешением. Анализатор работает в параллельном режиме, что дает возможность одновременной регистрации ионов всех масс.

Масс-спектропия вторичных ионов имеет гораздо большую чувствительность по сравнению с рентгеновским микроанализом. Пределы обнаружения при использовании этого метода очень низкие (до одной триллионной), и его можно применять для анализа изотопов легких элементов, таких как углерод, азот, фтор, хлор и водород.

Однако главным недостатком является то, что тип метода — разрушающий. Имеются проблемы с калибровкой, поскольку выход определенного иона зависит от концентрации других элементов. Недостатком метода также является наложение пиков за счет одинакового значения e/m . Это

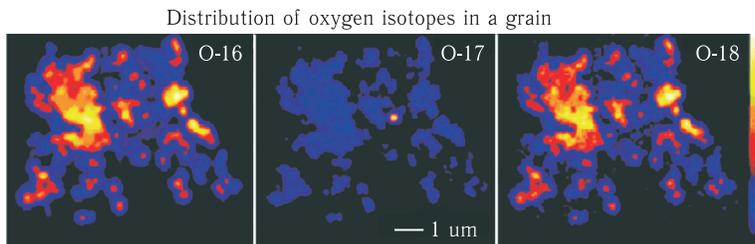


Рис. 18. Распределение изотопов кислорода в зерне космической пыли

возникает ввиду того, что ионы с большим зарядом имеют более короткое время пролета, и спектр регистрируется в виде зависимости от отношения заряда к массе, а не от массы. Данная проблема характерна для элементов, имеющих несколько изотопов. Вместе с тем, имеются приборы, например фирмы САМЕСА, работающие в нанодиапазоне по пространственному разрешению (рис. 18).

Около 50 разновидностей (мод) приборов создано в последнее время с использованием механического зонда. Это и варианты сканирующей туннельной микроскопии СТМ, атомно-силовая микроскопия АСМ и т. п., которые чаще стали называть методами *сканирующей зондовой микроскопии СЗМ*. Принцип действия таких микроскопов основан на взаимодействии механического микрозонда с поверхностью исследуемого образца.

Микрозонд представляет собой тонкую пластинку-консоль, называемую кантилевером (рис. 19). На конце кантилевера расположен острый шип (радиус закругления от 1 до 10 нм), который при перемещении микрозонда приподнимается и опускается, очерчивая микрорельеф поверхности. На выступающем конце кантилевера расположена зеркальная площадка, на которую падает и от которой отражается луч лазера. Отклонение

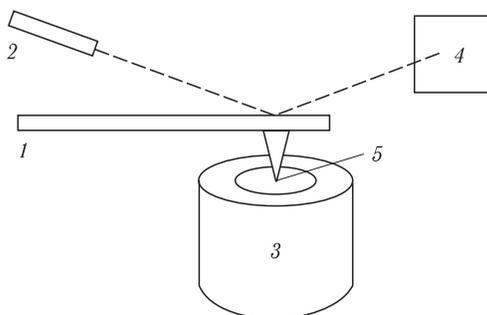


Рис. 19. Схема атомно-силового микроскопа: 1 — кантилевер с иглой; 2 — лазер; 3 — пьезоманипулятор точных перемещений; 4 — четырехсекционный фотодиод; 5 — острое, зондирующее образец

отраженного луча регистрируется фотодетектором. Данные фотодетектора используются в системе обратной связи, которая обеспечивает постоянную силу давления острия на образец.

Пространственное разрешение атомно-силового микроскопа зависит от радиуса кривизны кончика зонда. Разрешение достигает атомарного по вертикали и существенно превышает его по горизонтали. С помощью АСМ можно исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности. Кроме того, АСМ способен измерять рельеф образца, погруженного в жидкость, что позволяет работать с органическими молекулами, включая ДНК.

Помимо непосредственного исследования структуры поверхности методом контактной АСМ, можно регистрировать силы трения и адгезионные силы. В настоящее время разработаны многопроходные методики, при которых регистрируется не только топография, но и электростатическое или магнитное взаимодействие зонда с образцом. С помощью этих методик удастся определять магнитную и электронную структуру поверхности, строить распределения поверхностного потенциала и электрической емкости и т. д. Для этого используют специальные кантилеверы с магнитными или проводящими покрытиями. АСМ также применяются для модификации поверхности.

АСМ в состоянии обеспечить реальное атомное разрешение в условиях сверхвысокого вакуума, что создает определенные трудности в проведении измерений. Также к недостатку АСМ при его сравнении с РЭМ следует отнести небольшой размер поля сканирования. РЭМ в состоянии просканировать область поверхности размером в несколько миллиметров

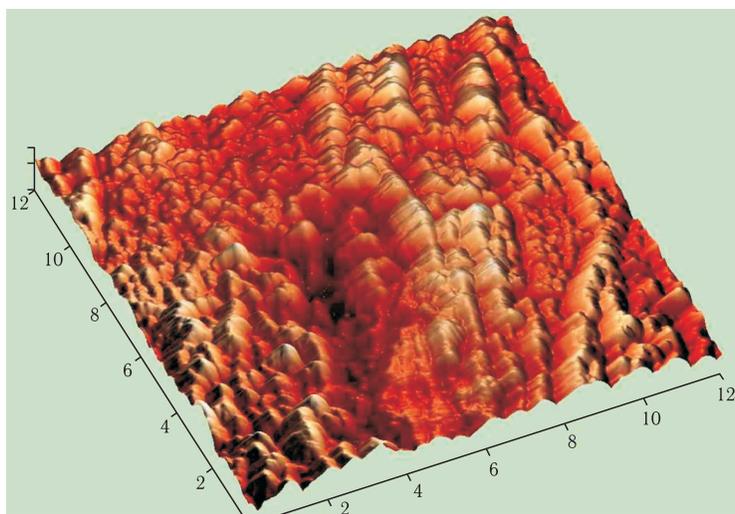


Рис. 20. 3D-реконструкция рельефа поверхности 12×12 мкм вблизи границы ПСО в атаксите Чинге после легкого травления ниталем

в латеральной плоскости с перепадом высот в несколько миллиметров в вертикальной плоскости. У АСМ максимальный перепад высот составляет несколько микрон, а максимальное поле сканирования в лучшем случае порядка 150×150 мкм. Другая проблема заключается в том, что при высоком разрешении качество изображения определяется радиусом кривизны кончика зонда, что при неправильном выборе зонда приводит к появлению артефактов на получаемом изображении. Обычный АСМ не в состоянии сканировать поверхность так же быстро, как это делает РЭМ. Для получения АСМ-изображения, как правило, требуется несколько минут.

Наш опыт использования методик СЗМ для вещества внеземного происхождения с субмикроскопической структурой показал, что можно получать наглядные результаты о рельефе поверхности (рис. 20) и конфигурации магнитных доменов на поверхности метеорита. Для наноскопических исследований финишная полировка выполнялась на коллоиде $0,04$ мкм SiO_2 .

В заключение следует отметить, что многие приборы и методы из описанных здесь весьма дорогостоящие, однако существующие в России и за рубежом центры коллективного пользования дают возможность применять их при проведении любых исследований. Разумеется, что измерения будут носить штучный, эксклюзивный характер. Этот факт требует очень грамотного планирования эксперимента, подбора образцов и постановки конкретной задачи операторам.

Приложение 3 (к разд. 4)
ПРОЕКТ: ШКАЛА «КОСМИЧЕСКИХ ПЫЛЕВЫХ
(МИКРОМЕТЕОРИТНЫХ) СОБЫТИЙ»
(COSMIC DUST EVENTS, CDE)

О. А. Корчагин

Геологический институт РАН, Москва

Цель. Разработка шкалы «космических пылевых (микрометеоритных) событий» фанерозоя в целях стратиграфического расчленения и корреляции разрезов.

Актуальность темы. Влияние поступающего на Землю космического вещества давно является одной из актуальных тем в науках о Земле и космосе. При этом обычно рассматривалась угроза со стороны падения на Землю крупных космических тел. Тщательные исследования катастрофических событий на рубежах мела–палеогена и перми–триаса — массовых вымираний биоты, изменения космической и вулканической активности, проведенные российскими специалистами из Института физики Земли (ИФЗ РАН) и Геологического института РАН (ГИН РАН), — позволили обнаружить два ранее слабо изученных явления — повышенную концентрацию токсичных веществ (в частности, мышьяка) [1, 2] и обилие

малоразмерных металлических частиц (микрометеоритов) космического происхождения [1–4]. Установленный факт повышенных концентраций мышьяка во время некоторых биосферных кризисов как возможная причина вымирания части наземной и морской биот привлек внимание и других специалистов [5]. Продолжилось также выявление повышенных концентраций разнообразных малоразмерных частиц космического происхождения на других стратиграфических уровнях и в других разрезах [6, 7].

В результате было установлено, что имеет место неравномерное распределение малоразмерных частиц космического вещества в осадочных горных породах в различных стратиграфических интервалах. Данное наблюдение опровергает традиционные представления о «фоновом» равномерном выпадении на Землю космического вещества, нарушаемом падением крупных космических тел (метеоритов, комет).

Соответственно, события чрезвычайно высокого поступления на Землю тонкодисперсных и малоразмерных частиц (микрометеоритов), зафиксированных прослоями, обогащенными космическим веществом, было предложено обозначать как «космические пылевые (микрометеоритные) события» (Cosmic Dust Events) и рассматривать это явление в качестве самостоятельного предмета исследований как возможной угрозы со стороны космоса Земле, ее атмосфере, гидросфере и жизни [8, 9]. Тогда же было высказано предположение о возможном негативном влиянии на жизнь на Земле процессов выпадения многочисленных тонкодисперсных и малоразмерных (микрометеоритов) космических частиц [4, 10].

Это предположение, став гипотезой, получило развитие в работах ученых из Имперского колледжа Лондона [11, 12]. В частности, было показано, что 4 млрд лет назад Земля (и Марс) подверглась мощнейшей микрометеоритной бомбардировке, в результате которой произошло нагревание атмосферы Земли до 1000 °С, плавление падавших микрометеоритов, сопровождавшееся выделением токсичного сернистого газа, образование аэрозольной взвеси из твердых микрочастиц и жидких капель сернистой кислоты (как результат растворения диоксида серы в воде), ослабление воздействия солнечных лучей на поверхность Земли и изменение климата в сторону похолодания [11, 12].

Таким образом, подмеченные российскими учеными явления — выпадения на Землю малоразмерных частиц (микрометеоритов) космического происхождения, сопровождаемые токсичными веществами (серой, возможно, мышьяком), оказались в центре внимания современной науки.

Перспективы и ближайшие задачи исследований космических пылевых (микрометеоритных) событий, их проявлений и степени влияния на Землю были определены в работе [12]. Среди них наиболее актуальными в ближайшее время являются:

1. Расширение представлений о географии и возрасте проявления «космических пылевых микрометеоритных событий» — выявление и локализация горизонтов с микрометеоритами на разных стратиграфических уровнях фанерозоя, описание морфологии, химического состава и разнообразия малоразмерных космических частиц.

2. Выработка идентификационных признаков «космических пылевых событий» (CDE) и «импактных событий» (IE), диагностика генезиса металлических частиц и микросфер в осадочных породах — космогенного, вулканогенного, гидротермального, метаморфогенного по морфологии, химическому и изотопному составу частиц (см. п. 4.1).

3. Установление диагностических признаков и локализация горизонтов ископаемых высокоуглеродистых сфероидов (возможно, фуллеренов), поступавших из космоса, и определение их роли в эволюционном процессе. Подобные горизонты локализованы, например, на рубеже перми-триаса в Китае, известны в Центральной России, обнаружены на рубеже альба–сеномана в Дагестане и описаны для периода на рубеже 12000–13000 лет назад, во время крупного вымирания мегафауны (мамонтов и др.) в Северной Америке.

4. Определение степени воздействия «космических пылевых микрометеоритных событий» на Землю, ее атмосферу и биосферу. В настоящее время установлено, что во время усиленного поступления на Землю космических микрометеоритных частиц в одних случаях происходили, в других случаях не происходили массовые вымирания биоты [12].

5. Определение возможности и сфер практического использования результатов проведенных исследований.

В связи со сказанным предполагается провести детальные минералогические, литологические и геохимические исследования малоразмерных космических частиц и вмещающих их горизонтов осадочных пород на разных стратиграфических уровнях.

План исследований.

1. Исследование малоразмерных космических частиц на рубеже мел–палеоген в сферуловых слоях кратера Чиксулуб (Мексика) и сравнение результатов с известными данными по микрометеоритам из «одновозрастных» отложений разрезов Стевенс Клинте (Дания) и Гамс (Австрия).

2. Определение состава космического вещества из пограничных отложений альба–сеномана разреза Губден (Дагестан) и сравнение его с известными данными из пограничных отложений альба–сеномана Крыма.

3. Уточнение химического состава горизонтов «силикатных микросфер», выявленных в верхнем сантоне и среднем туроне Крыма, в сферуловом горизонте №2 кратера Чиксулуб (Мексика) и определение сходства и различия выявленных микросфер.

4. Определение возможности идентификации одновозрастных частиц космического происхождения и перспектив их использования для целей стратиграфической корреляции.

Список литературы

1. Grachev A. F., Korchagin O. A., Kollmann H. A. et al. A New Look at the Nature of the Transitional Layer at the K/T Boundary near Gams, Eastern Alps, Austria, and the Problem of the Mass Extinction of the Biota // Rus. J. Earth Sci. 2005. V. 7. P. 1–45.

2. *Grachev A. F.* Minerals of the Transitional Layer in Gams Section. The K/T Boundary of Gams (Eastern Alps, Austria) and the Nature of Terminal Cretaceous Mass Extinction // *Abh. Geol. Bund.* 2009. Bd 63. P. 59–88.
3. *Грачев А. Ф., Корчагин О. А., Цельмович В. А. и др.* Космическая пыль и микрометеориты в переходном слое глины на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и химический состав // *Физика Земли.* 2008. Т. 7. С. 42–57.
4. *Корчагин О. А.* Присутствие металлических микросфер и микрочастиц в раннем сеномане Крыма — «Космическое пылевое событие» // *Докл. РАН.* 2010. Т. 431, № 6. С. 783–787.
5. *Bazley R.* Arsenic Poisoning Killed the Dinosaurs? // *Earth Science Ireland.* 2007. V. 1, No. 4.
6. *Grachev A. F., Tsel'movich V. A., Korchagin O. A., Kollmann H. A.* Two Spinel Populations from the Cretaceous-Paleogene (K/T) Boundary Clay Layer in the Gams Stratigraphic Sequence, Eastern Alps // *Rus. J. Earth Sci.* 2007. V. 10, No. 2. P. 1–11.
7. *Корчагин О. А., Цельмович В. А.* Космические частицы (микрометеориты) и наносферы из пограничного слоя глины между мелом и палеогеном (К/Т) разреза Стевенс Клинт, Дания // *Докл. РАН.* 2011. Т. 437, № 4. С. 520–525.
8. *Корчагин О. А., Цельмович В. А., Поспелов И. И. и др.* Космические магнетитовые микросферы и металлические частицы вблизи границы пермь-триас в Точке глобального стратотипа границы (слой 27, Мэйшань, Китай) // *Докл. РАН.* 2010. Т. 432, № 2. С. 232–238.
9. *Корчагин О. А.* Ископаемые микрометеориты, микротектиты и микрокрититы: методика исследований, классификация и импакт-стратиграфическая шкала // *Стратиграфия в начале XXI века — тенденции и новые идеи. Очерки по региональной геологии России.* М.: Геолкарт-ГЕОС, 2013. Вып. 6. С. 112–142.
10. *Dredge I., Parmell J., Lindgren P., Bowden S.* Elevated Flux of Cosmic Spherules (Micrometeorites) in Ordovician Rocks of the Durness Groupe, NW Scotland // *Scottish J. Geol.* 2010. V. 46. P. 7–16.
11. *Court R. W., Sephton M. A.* The Contribution of Sulphur Dioxide from Ablating Micrometeorites to the Atmospheres of Earth and Mars // *Geochim. et Cosmochimica Acta.* 2011. V. 75. P. 1704–1717.
12. *Court R. W., Sephton M. A.* Extrasolar Planets and False Atmospheric Biosignatures: The Role of Micrometeoritic Dust // *Planetary and Space Science.* 2012. V. 73, No. 1. P. 233–242.

Приложение 4 (к разд. 5)
ОТБОР ПРОБ СНЕГА И МОРСКОГО ЛЬДА
НА КОСМИЧЕСКУЮ ПЫЛЬ, 2011 Г.

А. С. Петров

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
 (ФГБУ «ААНИИ»), Санкт-Петербург*

Программа осуществляется в рамках соглашения между ААНИИ и АКЦ ФИАН. По рекомендации специалистов из АКЦ ФИАН и ГАИШ

желательно было отобрать пробы с ледников на островах архипелага Северная Земля или с островов Ушакова или Шмидта. Поскольку полеты вертолета были запрещены пограничной службой, то был использован запасной вариант отбора снега и морского льда.

Отбор проб снега и морского льда был произведен 30 октября 2011 г. в ходе экспедиции по высадке персонала дрейфующей станции «Северный полюс-39» с атомного ледокола «Россия» в канадском секторе Арктики в ходе ледовой разведки в точке с координатами: широта $84^{\circ}08' N$, долгота $148^{\circ}50' W$. Давление 756 мм. Температура воздуха $-5,2^{\circ}C$, температура поверхности снега $-5,0^{\circ}C$.

Было выбрано поле остаточного однолетнего льда с включениями старого многолетнего. Бурение производилось пробоотборником «Ковакс» на старом сглаженном торосе многолетнего льда.

Было взято три шурфа по одному метру, так как интерес представляют именно верхние слои льда, аккумулирующие космическую пыль, а не лед, который намерз в нижней части. Первый шурф был забракован по причине загрязненности пробоотборника. Два последующих были распилены по 50 см, упакованы в полиэтилен, пронумерованы и сложены в термоизоляционный бокс. Шурфы маркировались римскими цифрами, арабскими были помечены верхняя 1 и нижняя 2 части.



Отбор снега производился в 50 м от места отбора льда с наветренной стороны в стерильном комбинезоне и перчатках стерильным пластиковым совком в термоизоляционный бокс, который был заклеен скотчем на месте отбора. (см. фото).

На ледоколе пробы были помещены в морозильную камеру для доставки в порт Мурманска.

Благодарности. Составители сборника выражают благодарность А. Ф. Грачеву за полезные дискуссии.

**ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА ЗЕМЛЕ**
(К программе исследования)

2013-138

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 27.02.2014.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 7,2. Тираж 135. Заказ № 58198.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/