

04.1

Микроволновый разряд в имитаторе лунной пыли с добавлением карбоната аммония для исследования предбиологического синтеза

© В.Д. Борзосеков^{1,2}, В.В. Гудкова^{1,2}, М.А. Зайцев³, Т.И. Морозова³, А.С. Соколов¹, А.В. Князев¹, А.А. Летунов¹, Н.Н. Скворцова¹, А.Д. Резаева^{1,2}, Д.В. Малахов¹, В.А. Титов⁴, В.Д. Степахин¹

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

² Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

³ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁴ Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

E-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 22 мая 2024 г.

Принято к публикации 28 мая 2024 г.

С использованием микроволнового разряда получены плазменно-пылевые облака в среде газов и паров, которые могли присутствовать в атмосфере ранней Земли. Источником молекул H_2O , NH_3 и CO_2 были процессы разложения под действием разряда карбоната аммония, добавленного к основному исследуемому материалу — имитатору лунной пыли LMS-1D. Спектры излучения разряда показали появление молекулярных полос OH , NH , CN , C_2 в плазменно-пылевом облаке. Путем сравнения экспериментальных и рассчитанных контуров полос, отвечающих электронно-колебательным переходам CN ($B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$, $\Delta v = 0$), найдены колебательная ($T_v = 5000$ К) и вращательная ($T_r = 2500$ К) температуры CN ($B^2\Sigma$).

Ключевые слова: предбиологический синтез, атмосфера ранней Земли, микроволновый разряд, имитатор лунной пыли.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.18.58629.19979

Начиная с экспериментов Миллера [1] продолжают попытки моделировать в лабораторных условиях процессы предбиологического синтеза простейших органических молекул. Как правило, исследуется действие газовых разрядов на смеси, имитирующие раннюю атмосферу Земли, или энергетическое воздействие на контактирующие с атмосферой твердые мишени, которые имитируют состав предполагаемых пород ранней Земли, комет и астероидов/метеороидов. Воздействия на мишень лазерного излучения с высокой плотностью мощности [2–4] либо высокоскоростного механического удара [5] моделируют условия, которые создаются при ударах метеороидов, и сопровождаются образованием комплексной среды: плазмы в парогазовом облаке, содержащем пылевые частицы и микрокапли расплавов. Хвосты метеороидов и пылевая плазма в их составе могут служить системой, пригодной для предбиологического синтеза, когда пылевые частицы выступают в качестве центров кристаллизации или катализаторов реакций синтеза.

Целью представленных в настоящей работе экспериментов было воссоздание плазменно-пылевого облака в условиях гипотетической атмосферы ранней Земли с помощью микроволнового разряда в порошке — имитаторе лунной пыли. На принципиальную возможность использования микроволнового разряда, возникающего в порошковых образцах под действием излучения мощного гиротрона [6], для моделирования отдельных этапов предбиологической химической эволюции указывают достигаемые в экспериментах значения температуры газа

и твердого тела, концентрации плазмы, а также скорости нагрева исходных веществ и возможность быстрого остывания синтезированных соединений при выходе из разряда (термическая закалка). Вследствие пробоя порошковой смеси генерируется плазменно-пылевое облако, состоящее как из пылевых частиц, так и из паров входящих в состав мишени элементов [7].

В настоящей работе исследовано действие микроволнового излучения гиротрона в виде последовательности из трех импульсов длительностью 2 ms с паузами между ними 8.5 ms (рис. 1). Мощность излучения составляла 400 kW, что для гауссова пучка диаметром 6 см в области облучаемого образца соответствует средней по сечению пучка плотности мощности 14 kW/cm² и среднеквадратичному значению напряженности электрического поля 2.3 kV/cm. В качестве неорганической мишени использовали имитатор лунной пыли LMS-1D (1 g) [8], созданный на основе минералов и горных пород: пироксена, базальта с содержанием стекла, анортита, оливина, ильменита. Часть минералов, входящих в состав имитатора, характерна для метеорных тел, поэтому использование такого образца оправдано на этапе отработки эксперимента. В качестве источника газов, присутствовавших в атмосфере ранней Земли, к порошку добавляли карбонат аммония $(NH_4)_2CO_3$ (0.2 g), который при нагреве выше 60°C разлагается на CO_2 , NH_3 , H_2O . Герметичную камеру-реактор, в которую помещали порошок, заполняли аргоном до давления 1 atm.

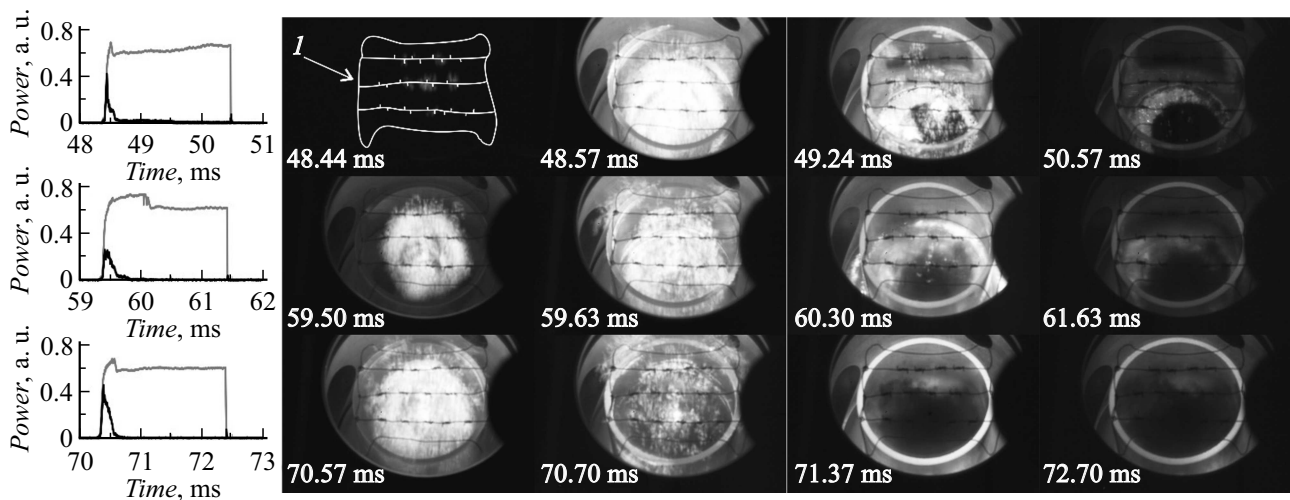


Рис. 1. Кадры (экспозиция $130\ \mu\text{s}$) развития микроволнового разряда. Верхний ряд — для первого импульса последовательности, средний — для второго, нижний — для третьего. 1 — абрис инициатора микроволнового подпорогового разряда в виде никелевой проволоки. На вставках — временной ход мощности излучения гиротрона (серая кривая), мощности, прошедшей через порошковый образец и плазменно-пылевое облако (черная кривая).

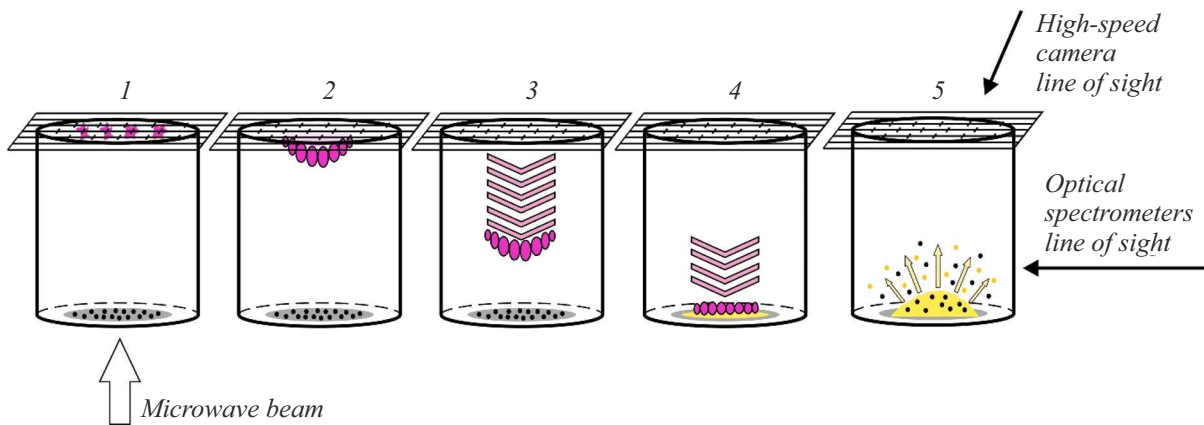


Рис. 2. Стадии развития разрядов в эксперименте. 1 — образование самостоятельного разряда на инициаторе из никелевой проволоки, 2 — формирование фронта подпорогового микроволнового разряда вблизи областей самостоятельного разряда, 3 — распространение подпорогового разряда вниз к порошковому образцу, 4 — достижение фронтом подпорогового разряда порошкового образца и начало развития микроволнового разряда в образце, 5 — развитие разряда в порошковом образце с формированием плазменно-пылевого облака и разлетом частиц.

Микроволновое излучение направляли вертикально снизу на слой порошкового образца, горизонтально расположенный в реакторе на кварцевой подложке. Для упрощения пробоя и образования плазменно-пылевого облака в 7 см над образцом установлен инициатор микроволнового подпорогового разряда [9,10] в виде никелевой проволоки (рис. 1). Иницированный подпороговый разряд распространялся в сторону источника микроволнового излучения и доходил до поверхности порошка. В результате воздействия плазмы (точный механизм не установлен, возможные факторы: нагрев, УФ- и видимое излучение, потоки заряженных частиц) развивался разряд в самом порошковом образце, что приводило к росту поглощения микроволновой энергии,

испарению вещества образца, разлету частиц и образованию плазменно-пылевого облака (рис. 1). В упрощенном виде последовательные стадии развития иницированного подпорогового разряда и микроволнового разряда в порошковом образце представлены на схемах (рис. 2).

По спектрам излучения плазмы (рис. 3) определяли качественный состав газовой среды. Было использовано два спектрометра: двухканальный AvaSpec-ULS4096-CL-2-EVO (канал 2109527U2 в диапазоне 219–381 нм с разрешением ~ 0.1 нм, рис. 3, *a*; канал 2109528U2 в диапазоне 379–521 нм с разрешением ~ 0.1 нм, рис. 3, *b* и *c*) и одноканальный AvaSpec-ULS2048CL-EVO (в диапазоне 520–739 нм с разрешением ~ 0.25 нм, рис. 3, *d*). Линия обзора спек-

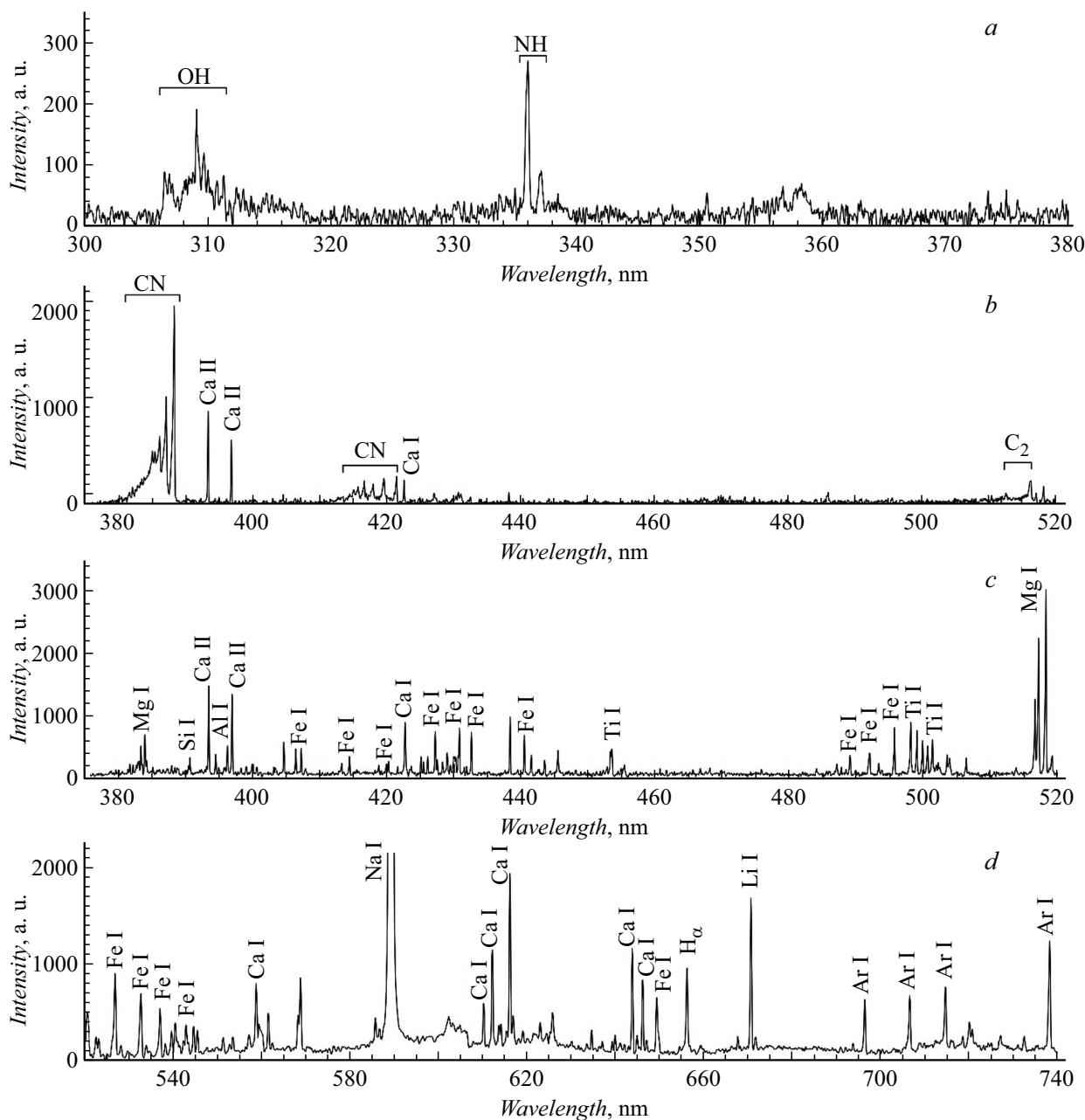


Рис. 3. Фрагменты спектров излучения разряда. *a, b* — первый импульс; *c, d* — третий импульс.

тронетров была направлена горизонтально на высоте 2–3 см над поверхностью порошка. Первый импульс гиротрона приводил к быстрому развитию инициированного подпорогового разряда и нагреву поверхности порошка, но разряд в порошке не развивался, существенного разлета частиц и образования плазменно-пылевого облака не наблюдалось (верхний ряд кадров на рис. 1). Однако нагрева хватало для разложения карбоната аммония. В спектрах свечения первого импульса наряду с линиями аргона Ar I и водорода H_{α} зарегистрированы молекулярные полосы OH ($A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$, 306.4 nm), NH ($A^3\Pi \rightarrow X^3\Sigma$, 336 и 337 nm), CN ($B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$, 386–388.5 и 415–422 nm), C_2 ($d^3\Pi \rightarrow a^3\Pi$, 516.5 nm)

(рис. 3, *a, b*). При последующих импульсах в спектрах появлялись многочисленные линии железа Fe I, магния Mg I, титана Ti I, кремния Si I и кальция Ca I (рис. 3, *c, d*), оксиды которых присутствовали в образце как петрогенные окислы. Интенсивности полос OH, NH, CN, C_2 во втором и третьем импульсах были значительно ниже.

Ширина линии H_{α} ($\Delta\lambda = 0.39$ nm) близка к аппаратной функции спектрометра (0.35 nm), что не позволило определить плотность плазмы. Уширение линии H_{α} , зарегистрированной ранее с использованием монохроматора-спектрографа М833 с более высоким спектральным разрешением, показало, что характерные значения плотности плазмы для микроволнового разряда

в порошковых образцах $n_e = (4-8) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Путем сравнения экспериментальных и рассчитанных с использованием программы LIFBASE [11] контуров полос в интервале 386–388.5 nm, отвечающих электронно-колебательным переходам CN ($B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$, $\Delta v = 0$), были найдены колебательная ($T_v = 5000 \text{ K}$) и вращательная ($T_r = 2500 \text{ K}$) температуры CN ($B^2\Sigma$).

Добавление азотсодержащих веществ-предшественников в испаряемую мишень при исследовании предбиологического синтеза применялось и ранее [12], однако с использованием микроволнового разряда в порошковых образцах такой эксперимент поставлен впервые. Полученная плазма может служить лабораторной моделью пылевой плазмы хвостов метеороидов при их пролете в ранней атмосфере Земли. Образование плазменно-пылевых облаков, разрушение петрогенных оксидов и наличие в спектрах излучения линий и полос радикалов — предшественников органических соединений или продуктов их распада — свидетельствуют о потенциальной возможности использования микроволнового разряда в предложенной постановке эксперимента для моделирования отдельных этапов предбиологического синтеза органических соединений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.L. Miller, *Science*, **117** (3046), 528 (1953). DOI: 10.1126/science.117.3046.528
- [2] Г.Г. Манагадзе, *ЖЭТФ*, **124** (1), 55 (2003). [G.G. Managadze, *JETP*, **97** (1), 49 (2003). DOI: 10.1134/1.1600796].
- [3] M. Ferus, P. Rimmer, G. Cassone, A. Kníšek, S. Civiš, J.E. Šponer, O. Ivanek, J. Šponer, H. Saacidfirozeh, P. Kubelík, R. Dudžák, L. Petera, L. Juha, A. Pastorek, A. Křivková, M. Krš, *Astrobiology*, **20** (12), 1476 (2020). DOI: 10.1089/ast.2020.2231
- [4] М.А. Зайцев, М.В. Герасимов, Э.Н. Сафонова, А.С. Васильева, *Астрон. вестн. Исследования Солнечной системы*, **50** (2), 123 (2016). DOI: 10.7868/S0320930X16020080 [M.A. Zaitsev, M.V. Gerasimov, E.N. Safonova, A.S. Vasiljeva, *Sol. Syst. Res.*, **50** (2), 113 (2016). DOI: 10.1134/S0038094616020076].
- [5] Z. Martins, M.C. Price, N. Goldman, M.A. Sephton, M.J. Burchell, *Nat. Geosci.*, **6**, 1045 (2013). DOI: 10.1038/ngeo1930
- [6] Г.М. Батанов, И.А. Косский, *Физика плазмы*, **41** (10), 918 (2015). DOI: 10.7868/S0367292115090024 [G.M. Batanov, I.A. Kossyi, *Plasma Phys. Rep.*, **41** (10), 847 (2015). DOI: 10.1134/S1063780X15090020].
- [7] Н.Н. Скворцова, Д.В. Малахов, В.Д. Степахин, С.А. Майоров, Г.М. Батанов, В.Д. Борзосеков, Е.М. Кончеков, Л.В. Колик, А.А. Летунов, Е.А. Образцова, А.Е. Петров, Д.О. Поздняков, К.А. Сарксян, А.А. Сорокин, Г.В. Укрыков, Н.К. Харчев, *Письма в ЖЭТФ*, **106** (4), 240 (2017). DOI: 10.7868/S0370274X17160111
- [8] [N.N. Skvortsova, D.V. Malakhov, V.D. Stepakhin, S.A. Maiorov, G.M. Batanov, V.D. Borzosekov, E.M. Konchekov, L.V. Kolik, A.A. Letunov, E.A. Obratsova, A.E. Petrov, D.O. Pozdnyakov, K.A. Sarksyian, A.A. Sorokin, G.V. Ukryukov, N.K. Kharchev, *JETP Lett.*, **106** (4), 262 (2017). DOI: 10.1134/S0021364017160135].
- [9] J.M. Long-Fox, D.T. Britt, *Front. Space Technol.*, **4**, 1255535 (2023). DOI: 10.3389/frspt.2023.1255535
- [10] К.В. Артемьев, Г.М. Батанов, Н.К. Бережечкая, В.Д. Борзосеков, Л.В. Колик, Е.М. Кончеков, И.А. Косский, Д.В. Малахов, А.Е. Петров, К.А. Сарксян, В.Д. Степахин, Н.К. Харчев, *Письма в ЖЭТФ*, **107** (4), 223 (2018). DOI: 10.7868/S0370274X18040033 [K.V. Artem'ev, G.M. Batanov, N.K. Berezhetskaya, V.D. Borzosekov, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, I.A. Kossyi, D.V. Malakhov, A.E. Petrov, K.A. Sarksyian, V.D. Stepakhin, N.K. Kharchev, *JETP Lett.*, **107** (4), 219 (2018). DOI: 10.1134/S0021364018040045].
- [11] A. Sidorov, S. Razin, A. Veselov, M. Viktorov, A. Vodopyanov, A. Luchinin, M. Glyavin, *Phys. Plasmas*, **27** (9), 093509 (2020). DOI: 10.1063/5.0012583
- [12] J. Luque, D.R. Crosley, *LIFBASE: Database and Spectral Simulation Program (Version 1.5)*, SRI International Report MP 99-009 (1999). <https://www.sri.com/engage/products-solutions/lifbase>
- [13] М.В. Герасимов, Э.Н. Сафонова, в кн. *Проблемы зарождения и эволюции биосферы*, под ред. Э.М. Галимова (Кн. дом „ЛИБРОКОМ“, М., 2008), с. 145–153.