26 сентября

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 H₂O, NH₃ и CO₂ 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, C₂ в плазменно-пылевом облаке. Путем сравнения экспериментальных и рассчитанных контуров полос, отвечающих электронно-колебательным переходам CN ($B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$, $\Delta \nu = 0$), найдены колебательная ($T_v = 5000$ K) и вращательная ($T_r = 2500$ K) 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] продолжаются 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 cm 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, анортозита, 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 (NH₄)₂CO₃ (0.2 g), который при нагреве выше 60°C разлагается на CO₂, NH₃, H₂O. Герметичную камеру-реактор, в которую помещали порошок, заполняли аргоном до давления 1 atm.



Рис. 1. Кадры (экспозиция 130 µs) 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 ст над образцом установлен инициатор микроволнового подпорогового разряда [9,10] в виде никелевой проволоки (рис. 1). Инициированный 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,

Письма в ЖТФ, 2024, том 50, вып. 18

испарению вещества образца, разлету частиц и образованию плазменно-пылевого облака (рис. 1). В упрощенном виде последовательные стадии развития инициированного 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 nm с разрешением ~ 0.1 nm, рис. 3, *a*; канал 2109528U2 в диапазоне 379–521 nm с разрешением ~ 0.1 nm, рис. 3, *b* и *c*) и одноканальный AvaSpec-ULS2048CL-EVO (в диапазоне 520–739 nm с разрешением ~ 0.25 nm, рис. 3, *d*). Линия обзора спек-



Рис. З. Фрагменты спектров излучения разряда. а, b — первый импульс; с, d — третий импульс.

трометров была направлена горизонтально на высоте 2–3 ст 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 $(A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi, 306.4 \text{ nm})$, 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), C₂ $(d^3\Pi \rightarrow a^3\Pi, 516.5 \text{ nm})$

(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} ($\Delta \lambda = 0.39 \text{ nm}$) близка к аппаратной функции спектрометра (0.35 nm), что не позволило определить плотность плазмы. Уширение линии H_{α} , зарегистрированной ранее с использованием монохроматора-спектрографа M833 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 плазменнопылевых 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

- 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. Saeidfirozeh, 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
 [М.А. 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. Коссый, 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. Борозоссков, 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. Укрюков, Н.К. Харчев, Письма в ЖЭТФ, 106 (4), 240 (2017). DOI: 10.7868/S0370274X17160111

[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. Obraztsova,
A.E. Petrov, D.O. Pozdnyakov, K.A. Sarksyan, A.A. Sorokin,
G.V. Ukryukov, N.K. Kharchev, JETP Lett., 106 (4), 262 (2017). DOI: 10.1134/S0021364017160135].

- [8] J.M. Long-Fox, D.T. Britt, Front. Space Technol., 4, 1255535 (2023). DOI: 10.3389/frspt.2023.1255535
- [9] K.B. Артемьев, Г.М. Батанов, Н.К. Бережецкая, В.Д. Борзосеков, Л.В. Колик, E.M. Кончеков, И.А. Коссый, 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. Sarksyan, V.D. Stepakhin, N.K. Kharchev, JETP Lett., 107 (4), 219 (2018). DOI: 10.1134/S0021364018040045].
- [10] 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
- [11] 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

[12] 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.