

03:05;12

©1994 г.

ФРАКТАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В СВЕРХЗВУКОВЫХ СЛЕДАХ

Ю.Л. Серов, И.П. Явор

Экспериментально показано, что в сверх- и гиперзвуковых следах возможно образование фрактальных макроструктур из продуктов абляции тела, движущегося в атмосфере. Исследования проведены в диапазоне давлений воздуха от 2.5 до 500 Тор и чисел Маха от 2.9 до 12.4.

Образованию фрактальных структур в различных условиях посвящен ряд экспериментальных и теоретических исследований [1-3]. Такие структуры могут нести электрические заряды и являться основой долгоживущих плазменных образований. Известно, что следы за телами естественного или искусственного происхождения, движущимися в атмосфере с большой сверхзвуковой скоростью, зачастую являются долгоживущими радиоотражающими объектами со временем жизни, значительно превышающим время деионизации следа. Можно предположить, что такие свойства следов обусловлены наличием в них фрактальных металлических макроструктур, образующихся из продуктов абляции тела, уносимых в след, эффективность отражения радиосигнала которыми должна существенно зависеть от размеров и конфигурации отражающих частиц или структур. В области следа существуют значительные электрические поля [4,5], способствующие кластеризации дисперсных частиц и образованию фрактальных макроструктур. Представляет интерес исследование возможности образования фрактальных макроструктур в следах за железо-никелиевыми метеороидными телами, ферромагнитные свойства которых облегчают процесс слипания мелких частиц в кластеры. Это обстоятельство имеет значение в экспериментах на сравнительно коротких баллистических трассах с малым временем существования следа. Изучению такой возможности и посвящена настоящая работа.

Моделирование сверхзвуковых следов осуществлялось на лабораторной баллистической установке [6]. Изучение и анализ фрактальных образований в следах производились на участке трассы длиной 6 м. Методика проведения экспериментов включала ускорение и выстреливание тела, образующего след, сбор формирующихся в следе макроструктур и последующий их анализ. Выстреливаемыми телами являлись сферические модели диаметром 2 см, изготовленные из

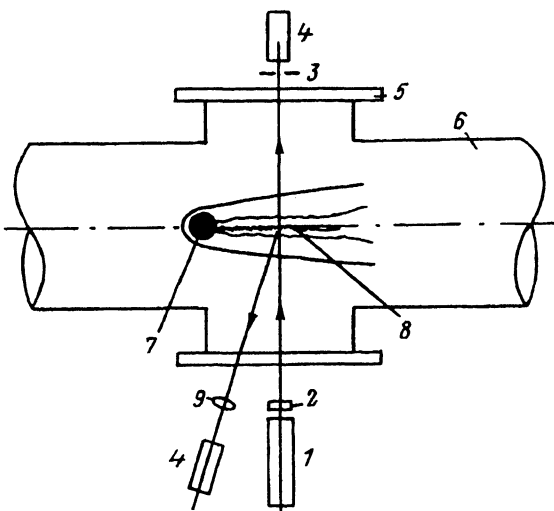


Рис. 1. Схема оптического контроля наличия инжестируемого в след вещества.

1 — лазер, 2 — цилиндрическая линза, 3 — щель, 4 — ФЭУ, 5 — фланец, 6 — барокамера, 7 — модель, 8 — след, 9 — линза.

дюралюминия. Использовались либо аблирующие модели с наружным покрытием, содержащим рабочее вещество, попадающее в след, либо сферические модели, имеющие полость, из которой инжестировалось в след это вещество в виде раствора соединения, содержащего это вещество и разлагающегося в следе, либо в виде мелкодисперсного порошка микронных размеров. Инжестирование осуществлялось через специальное сопло в область вязкого следа. В процессе выполнения экспериментов осуществлялся контроль за движением и ориентацией модели, а также наличием в следе инжестированного вещества.

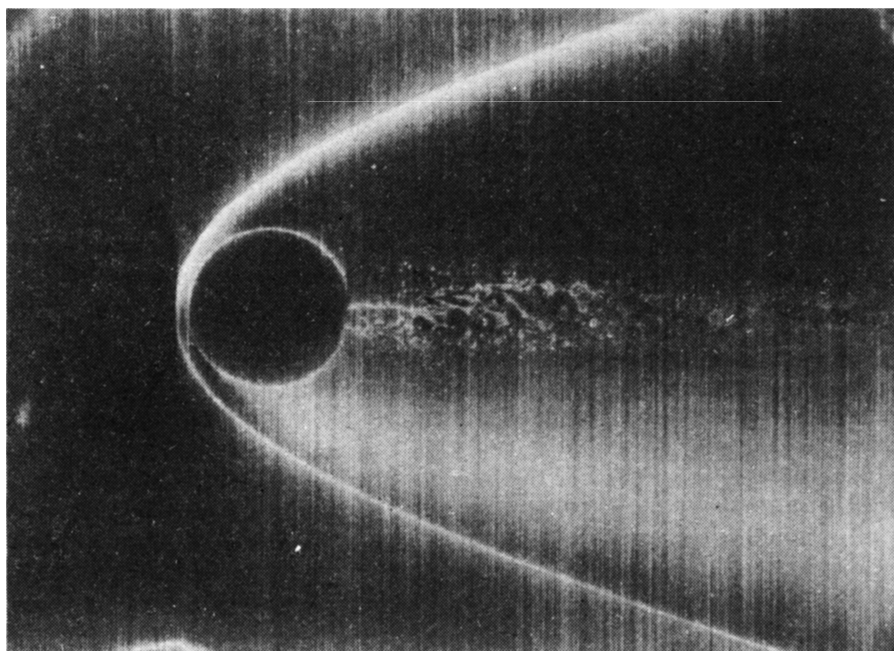


Рис. 2. Инжестия в след раствора сульфата никеля из сферической модели.

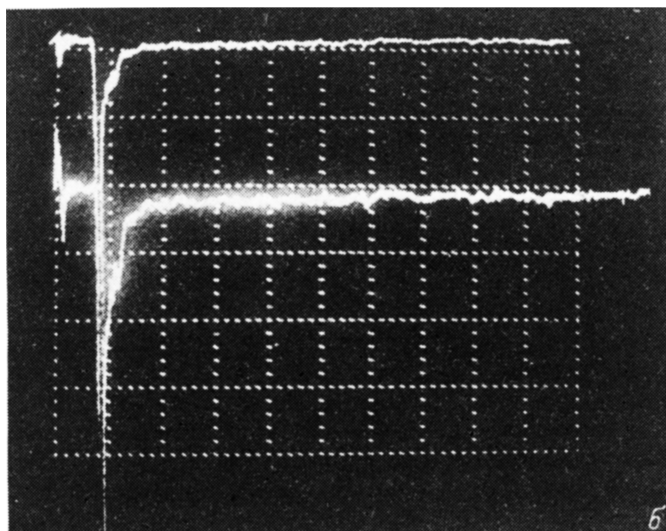
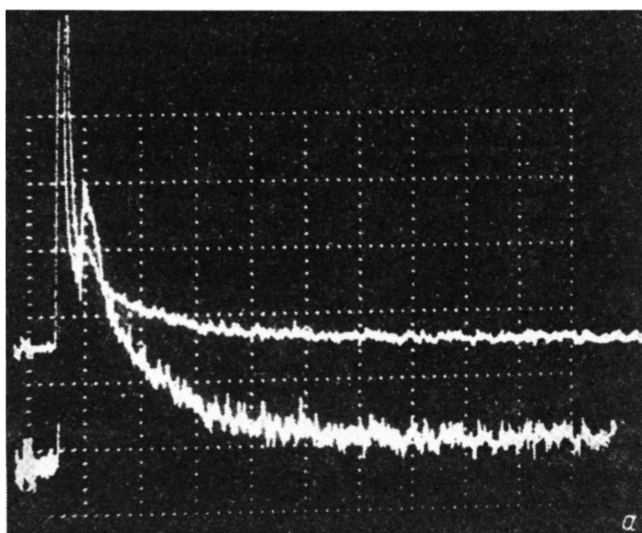


Рис. 3. Осциллограммы сигналов поглощения (а) и отражения (б), инжестируемых в след раствором NiSO_4 . Видно два одинаковых сигнала, полученных с разными чувствительностями усилителей.

Для контроля использовался теневой прибор Теплера, а также оптическая схема, приведенная на рис. 1. В ее основу положены ослабление и отражение лазерного пучка света, падающего на капли или частицы инжестируемого в след вещества. Использовался ленточный пучок света от гелий-неонового лазера, формируемый при помощи короткофокусной цилиндрической линзы. На рис. 2 показан теплеровский снимок модели, из которой поступает в след инжестируемый раствор. На рис. 3 представлены осциллограммы сигналов лазерного излучения в поглощении и отражении, свидетельствующие о наличии инжестируемого вещества в следе.

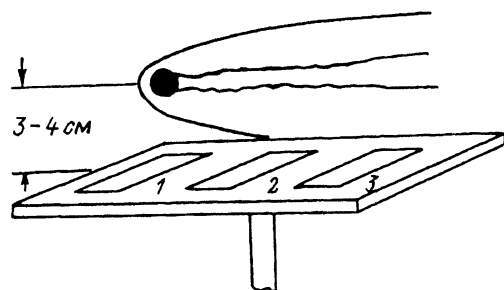


Рис. 4. Устройство с подложками (1-3) для сбора структур, осаждающихся из следа.

Для сбора образований, формирующихся в области следа, использовался метод осаждения их на специальные подложки (рис. 4), расположенные вдоль трассы. Впоследствии анализ осажденных образований производился при помощи биологического микроскопа, а также электронного сканирующего микроскопа с рентгеновским микроанализатором. Подложками служили покровные стекла, а для электронно-оптических исследований — листки медной фольги и листки слюды. На слюду с осажденными частицами напылялась тонкая пленка золота для устранения накопления заряда на слюде при сканировании электронным пучком и увеличения вторичной электронной эмиссии. Элементный анализ образований проводился при помощи рентгеновского микроанализатора по характеристическому рентгеновскому K_{α} -излучению.

Ниже приводятся результаты экспериментов, посвященных выяснению возможности образования в условиях сверхзвукового следа протяженных структур из металлических частиц с большой концентрацией свободных электронов, обладающих большой электропроводностью.

Эксперименты выполнялись в воздухе. Для моделирования условий движения на разных высотах в атмосфере изменялось давление в барокамере баллистической установки. С целью расширения диапазона моделирования скоростных режимов движения и физических условий в следе использовались смеси воздуха с ксеноном в различных пропорциях. Был охвачен диапазон давлений по воздуху от 2.5 до 500 Тор и диапазон чисел Маха от 2.9 до 12.4. При этом охватывался достаточно большой интервал температур торможения, развивающихся в ударном слое, и температур в следе, а также осуществлялось моделирование в широком интервале по частотам столкновений частиц в спутном потоке. С точки зрения слипания частиц в более крупные образования протяженных структур типа фрактальных важным фактором является частота столкновения между частицами инжектируемого вещества, которая зависит от плотности окружающей среды.

В качестве рабочего вещества использовался либо мелкий порошок никеля с частицами микронных размеров (0.2–2 мкм), либо сульфат никеля, который вводился в покрытие модели или инжектировался в след в виде насыщенного водного раствора $NiSO_4$. При температуре 106° С сульфат никеля разлагается. В растворе он диссоциирован. Если температура в следе достаточно высока и имеется значительное число электронов, то ион никеля захватывает электрон и появляется металлический никель, который далее слипается в частицы. Металлический никель может появляться в результате термического разложения сульфата никеля. В наших условиях, вероятно, работают оба механизма,

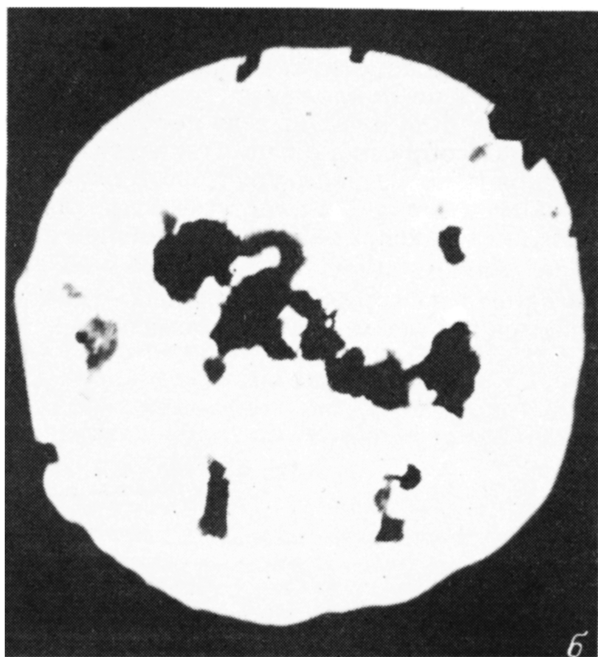
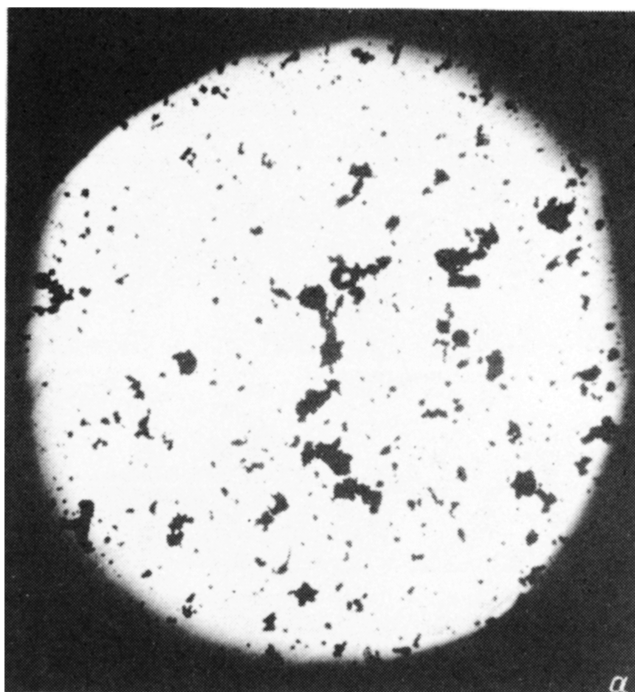


Рис. 5. Фрактальные макроструктуры под микроскопом с разным увеличением (а,б).

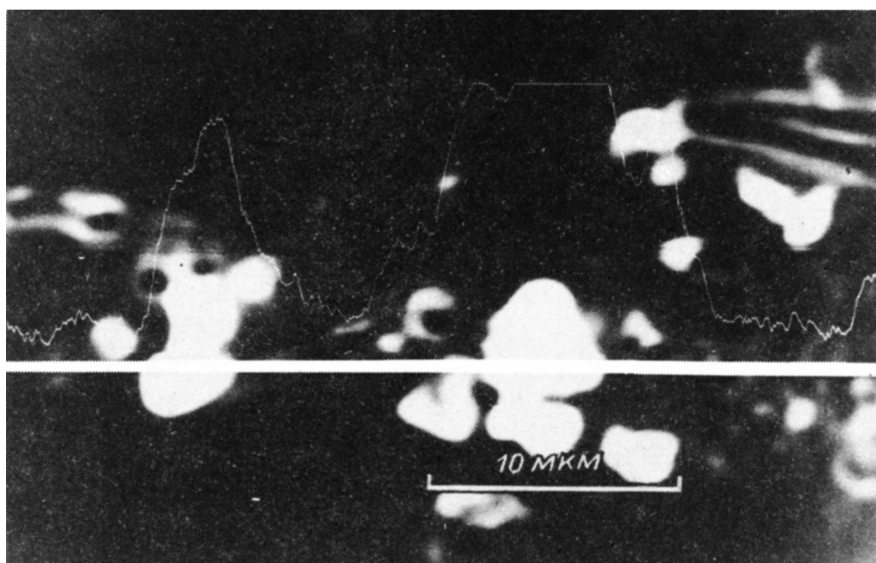


Рис. 6. Сигнал, полученный с рентгеновским микроанализатором.

поскольку температура в сверхзвуковом следе в исследуемом диапазоне скоростей достаточно велика. При добавлении ксенона температура в следе достигала 2–3 тысяч К. При этом идет интенсивное разложение сульфата никеля. При остывании следа до температуры ниже точки Кюри (для никеля $T_K = 328^\circ \text{C}$) притяжение частиц никеля за счет магнитных сил способствует образованию кластеров. Размеры частиц, осаждающихся на подложки из следа, распределены в очень широком диапазоне от субмикронных до нескольких десятков микрон. Было установлено, что образование частиц никеля происходит в широком диапазоне условий по температуре и плотности среды в следе. Их образование, а также слипание в кластеры и протяженные структуры зарегистрированы как в экспериментах с инъекцией раствора сульфата никеля, так и при абляции обложки с добавкой NiSO_4 .

Была также проведена серия контрольных экспериментов, в которых выстреливались чистые модели без обложки и неинжектируемые.

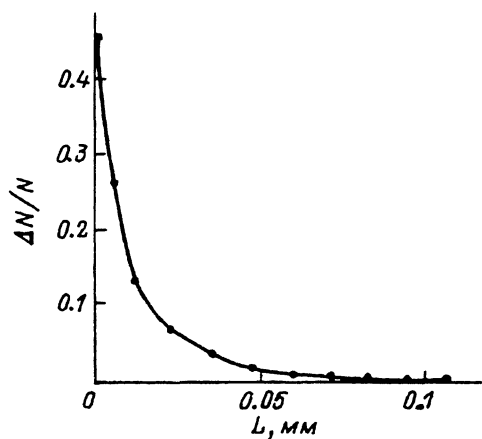


Рис. 7. Относительное распределение $\Delta N/N$ частиц, осевших на подложку, по их размерам L .

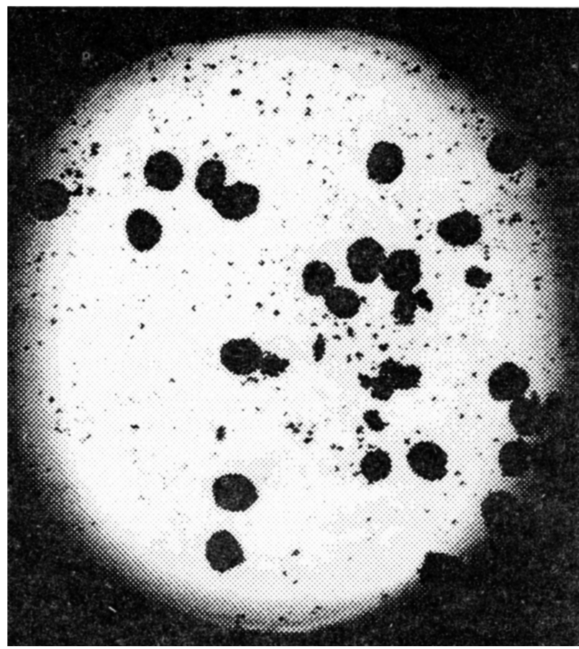


Рис. 8. Кластеры, образующиеся из никелевого порошка в свободном падении.

В этой серии на подложках среди очень редких пылевидных частиц не были зарегистрированы никелевые частицы или содержащие никель. В дальнейшем с целью устранения фазы химического разложения и ускорения формирования протяженных структур проводились эксперименты с инъекцией в след готового порошка из частиц никеля микронных размеров.

Главный результат всех проведенных экспериментов состоит в том, что независимо от механизма попадания или возникновения частиц никеля в след на подложках среди равномерно и хаотично распределенных мелких частиц никеля (1 мкм) наблюдаются протяженные образования (до 0.2 мм) в виде цепочек (фрактальные структуры). В среднем отношение длины такой цепочки к ее толщине составляет около 10. Отметим, что такие фрактальные структуры могут разрушаться в турбулентном потоке. На рис. 5 представлены фрактальные структуры, выпавшие из следа. Химический состав частиц и структур из них анализировался путем воздействия магнитным полем, а также при помощи рентгеновского микроанализатора (рис. 6). Установлено, что на подложках оседают никелевые частицы и образования из них. В экспери-

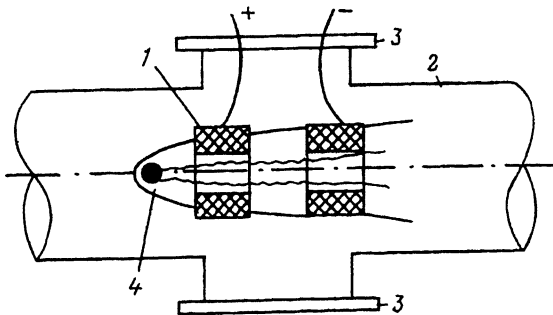


Рис. 9. Схема экспериментов с магнитным полем.

1 — катушки Гельмгольца, 2 — барокамера, 3 — фланцы, 4 — модель.

ментах главным образом с аблирующими моделями при низких давлениях наблюдалось выпадение также неразложившихся частиц NiSO_4 сравнительно крупных размеров (3–5 мкм). На рис. 7 представлено относительное распределение никелевых частиц и образований по размерам (ΔN — число частиц данного размера, а N — полное число частиц, выпавших на подложку). Размер кластера определяется временем его формирования. Время существования следа в наших условиях составляет доли секунды. В естественных условиях время рассеивания следа намного больше. Поэтому в больших пространственно-временных масштабах следует ожидать существенно больших размеров фрактальных образований. Доказательством такой точки зрения могут служить результаты проведенных нами экспериментов, в которых наблюдалось образование кластеров из частиц никелевого порошка микронных размеров в процессе свободного падения частиц порошка в воздухе при атмосферном давлении на длине 2 м. Фотография таких кластеров приведена на рис. 8. Их размер в поперечнике составляет ~ 75 мкм. В поле зрения видны частицы никеля, из которых кластеры сформированы (~ 2 мкм).

Как отмечалось выше, образованию связанных структур из ферромагнитных частиц должно способствовать наложение внешнего магнитного поля. Для проверки этого была проведена серия экспериментов, в которых часть следа двигалась через зону, в которой создавалось магнитное поле (~ 250) при помощи катушек Гельмгольца, питаемых постоянным током. Схема этих экспериментов показана на рис. 9. Подложки для сбора осажденных частиц располагались в непосредственной близости от катушек, а также между ними. В этих экспериментах не было зарегистрировано существенного возрастания количества осевших на подложки протяженных макроструктур из частиц никеля, что, по-видимому, объясняется малым временем воздействия магнитного поля, так как область его концентрации невелика (~ 15 см).

В заключение перечислим основные результаты проведенных исследований. Установлено, что в сверх- и гиперзвуковых следах возможно разложение продуктов абляции тела с образованием металлических частиц. Показано, что в следе происходит формирование кластеров из мелких частиц и протяженных структур из них, которые могут оказывать влияние на характеристики отражения радио- и ИК сигналов.

Выражаем благодарность В.А.Марихину и Л.П.Мясниковой за измерения на электронном микроскопе.

Список литературы

- [1] Смирнов В.М. // УФН. 1991. Т. 161. № 8. С. 141–153.
- [2] Бершадский А.Г. // УФН. 1990. Т. 160. № 12. С. 189.
- [3] Fractals in Physics / Ed. L. Pictonero, E. Tozatti. Amsterdam: North-Holland, 1986.
- [4] Серов Ю.Л., Явор И.П. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 9. С. 9.
- [5] Арсеньев В.В., Мишин Г.И. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 6. С. 122.
- [6] Басаргин И.В., Менде Н.П. и др. // Физикогазодинамические баллистические исследования. Л.: Наука, 1980. С. 171–179.

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
12 мая 1993 г.
В окончательной редакции
6 октября 1993 г.