

А.Н. Алексеев, Т.В. Андрухова

Воздействие мощного лазерного излучения на вещество твердофазного атмосферного аэрозоля (на примере PbO)

A.N. Alekseev, T.V. Andrukova

Influence of Powerful Laser Radiation on the Atmospheric Aerosol Substance (on the example of PbO)

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию процесса взаимодействия мощного лазерного излучения (МЛИ) с мишенями, состоящими из веществ, встречающихся в аэрозольной форме, и дисперсности вторичных частиц после воздействия МЛИ (на примере PbO).

Ключевые слова: аэрозоль, мощное лазерное излучение, вторичные частицы, переконденсация, структурные превращения, фрактальные агрегаты.

Given article is devoted to an experimental research on process of interaction between powerful laser radiation (PLR) and the targets that consist of substances which are found in the aerosol form, and dispersivity of secondary particles after influence of PLR (on the example of PbO).

Key words: aerosol, powerfull laser radiation, secondary particles, condensate, structural changes, fractal aggregation.

Цель данной работы – экспериментальное исследование дисперсного состава и рентгеноструктурного анализа аэрозоля, образованного при воздействии мощного лазерного излучения (МЛИ) на твердые образцы некоторых веществ.

Для исследования процессов взаимодействия МЛИ с материалами, входящими в состав атмосферных аэрозолей, а также для анализа структуры возникающих при этом вторичных частиц была собрана

установка (рис. 1) и сделаны плоские образцы-мишени каждого вещества. Они изготавливались из таких веществ, как NaHSO₄, Na₂SO₄, Na₂SO₃, NH₄Cl, PbO, FeCl₃·6H₂O, встречающихся в приземном слое атмосферы. Воздействие на образцы проводилось сфокусированным излучением CO₂-лазера, с длиной волны 10,6 мкм, при различных мощностях 75–250 Вт и времени воздействия ~ 5–15 с, диаметр пятна фокусировки составлял 0,5–2 мм.

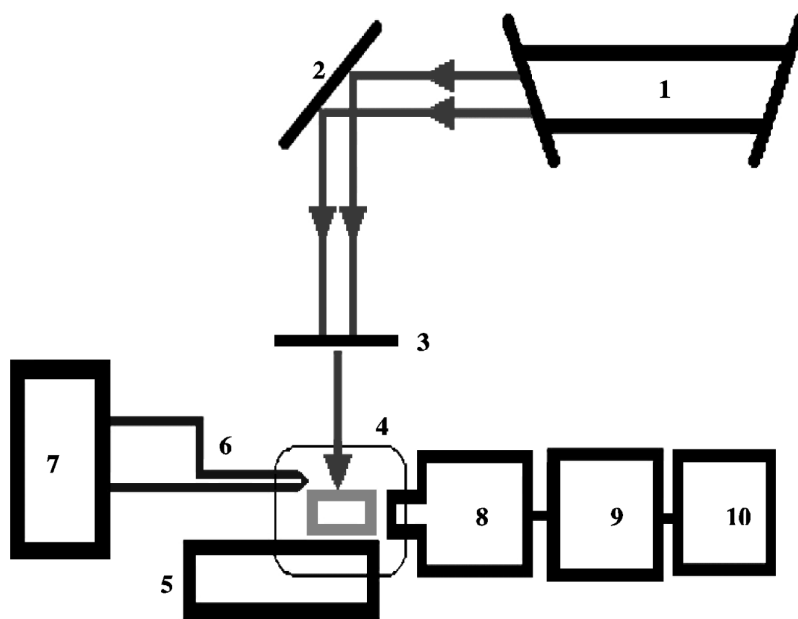


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – CO₂-лазер; 2 – поворотное зеркало; 3 – фокусирующая линза; 4 – образец; 5 – подвижный столик; 6 – платиноводиевая термопара; 7 – милливольтметр; 8 – пирометр спектрального отношения; 9 – устройство сопряжения; 10 – компьютер

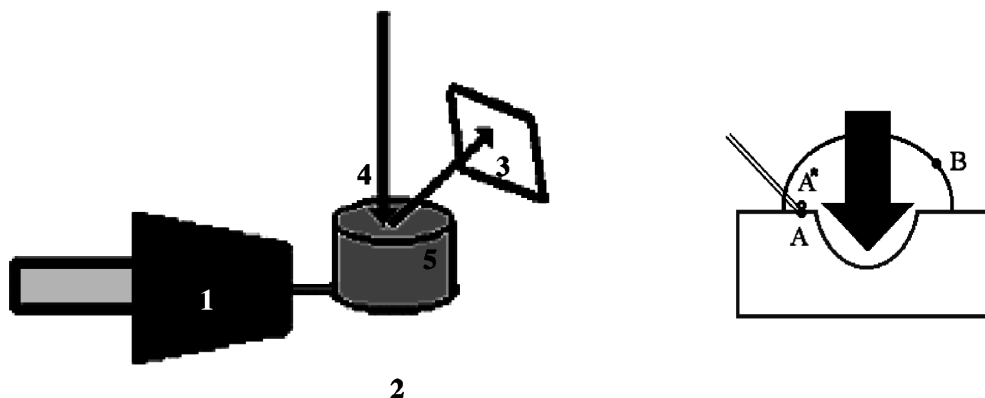


Рис. 2. Схема держателя получения вторичных частиц в вакуумной камере при пониженном давлении и область воздействия лазерного излучения на образец:
 1 – держатель для таблетки; 2 – таблетка; 3 – подложка для вторичных частиц; 4 – лазерный луч; 5 – основной поток выброса вторичных частиц. Точками А и А* отмечены области измерения температуры с помощью термопары, точкой В обозначена область, в которой температура измеряется микропирометром

При воздействии МЛИ на поверхность мишени происходили быстрый разогрев, разрушение и испарение исследуемого вещества. Вторичные частицы, образовавшиеся в результате воздействия на мишени, собирались на кварцевую подложку, расположенную на расстоянии 2–5 мм от фокуса линзы (рис. 2).

Далее подложка помещалась под микроскоп, проводилось визуальное определение количества частиц, а также выборочно осуществлялось их микрофотографирование. Кроме того, проводился рентгеноструктурный анализ указанных выше веществ с помощью установки «Дрон-2», по методике, описанной в работе [1]. Выброс продуктов разрушения происходил в виде светящейся плазменной струи. По мере увеличения времени воздействия можно выделить три основных стадии: 1 – свечение мишени; 2 – появление и рост факела выброса паров;

3 – активный выброс полидисперсных частиц расплава. Наличие задержки между началом воздействия лазерного излучения и моментом появления пара объясняется тем, что часть энергии в начале воздействия затрачивается на разогрев мишени до температуры, при которой начинается интенсивное испарение вещества. Высокоскоростное испарение частицы характеризуется большой неоднородностью температурного поля и значительным температурным градиентом. Температура поверхности существенным образом зависит от режима взаимодействия и имеет определенную временную динамику.

Процентное распределение вторичных частиц по размерам при воздействии МЛИ на мишени и логнормальное распределение для образцов PbO показаны на рисунках 3, 4.

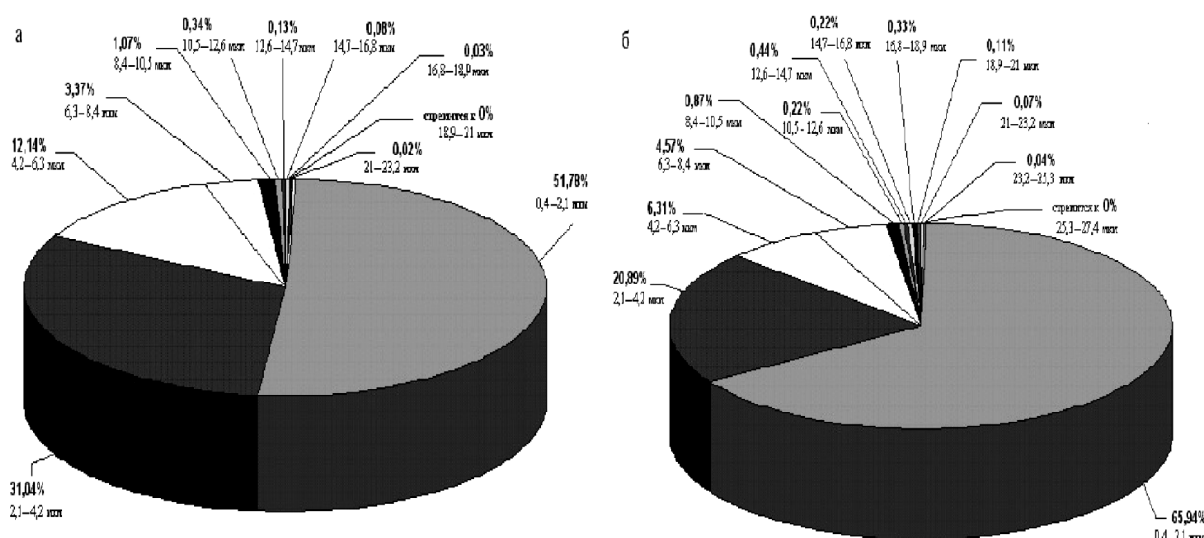


Рис. 3. Процентное распределение вторичных частиц по размерам при взаимодействии МЛИ с веществом PbO: а – при пониженном давлении; б – при нормальных условиях

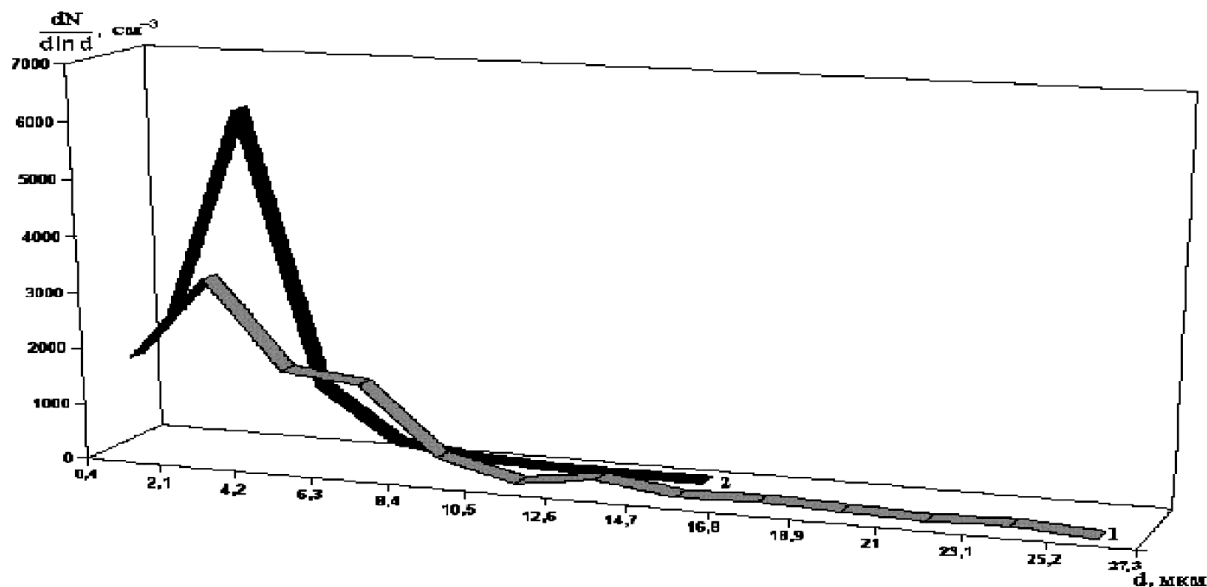


Рис. 4. Распределение вторичных частиц по размерам, полученным при взаимодействии МЛИ с PbO: 1 – при пониженном давлении; 2 – при нормальных условиях

Более 70% частиц, полученных в процессе испарения, попадают в интервал от 0,4 до 6 мкм. Замечено, что для PbO при изменении давления в функции распределения частиц по размерам наблюдается изменение процентного соотношения между мелкими и крупными частицами. Для некоторых веществ получено, что при изменении давления в функции распределения частиц по размерам появляются два максимума (так как более крупные частицы агрегированы из мелких) и происходит уширение указанного выше интервала. Наиболее вероятной причиной такого распределения по размерам вторичных частиц является увеличение скорости истечения паров при снижении давления и, следовательно, уменьшение вероятности слияния частиц в процессе конденсационного роста [2–4].

Процесс конденсации происходит во время лазерного воздействия. Схема образования конденсационных частиц следующая: лазерное излучение разогревает мишень до температуры кипения, образующиеся пары истекают в виде струи в окружающее пространство. Ускорение паров до звуковой скорости происходит в тонком слое у поверхности, при этом пар резко охлаждается и переходит в неустойчивое пересыщенное состояние, которое в дальнейшем, вследствие конденсационного скачка, переходит в насыщенное [2–6]. Вещество в зависимости от условий (давления и температуры) может находиться в различных формах и состояниях. Сначала идет образование из частиц длинных нитей, что характерно для частиц в сильных электрических полях, которые затем обрастают частицами. Наблюдалось образование нескольких видов частиц: частицы расплава и частицы конденсационного типа.

При относительно низких давлениях и температурах парогазовая среда конденсируется; структура

конденсата может быть периодической (чистые кристаллы) и непериодической (жидкость, аморфные твердые тела, сплавы, полимеры) [7]. В некоторых случаях конденсат может обладать структурными свойствами, промежуточными между свойствами твердого кристалла и жидкости (жидкие или мезоморфные кристаллы). С ростом давления и температуры структура конденсата упрощается; молекулы или молекулярные комплексы разрушаются, и конденсат переходит в чисто атомарное состояние. Электронные оболочки атомов перестраиваются, происходит отрыв наружных электронов, определяющих химическую индивидуальность вещества.

Фрактальные агрегаты обычно образуются при ассоциации случайно движущихся частиц и обладают свойствами неидеальных фрактальных систем. Агрегаты имеют конечный размер. Это происходит, как правило, по двум причинам: из-за деформации структуры агрегатов тепловыми флуктуациями и гравитационными силами; наличия конечного размера фрактального агрегата, или, точнее, такого размера, превышение которого приводит к усреднению однородности подобных агрегатов, также может происходить из-за условия роста агрегатов [8]. Фрактальным структурам присуще свойство самоподобия. Объединение частиц может происходить тремя путями: диффузионно-ограниченное агрегатообразование, кластер-кластерное, химически ограниченное образование агрегатов. Каждому механизму присуща своя фрактальная размерность.

В первом случае рост агрегатов происходит за счет присоединения отдельных частиц, движущихся по случайным траекториям. Во втором – частицы сначала объединяются в небольшие агрегаты, а окончательный рост агрегатов происходит из более мелких, при этом образуются рыхлые агрегаты.

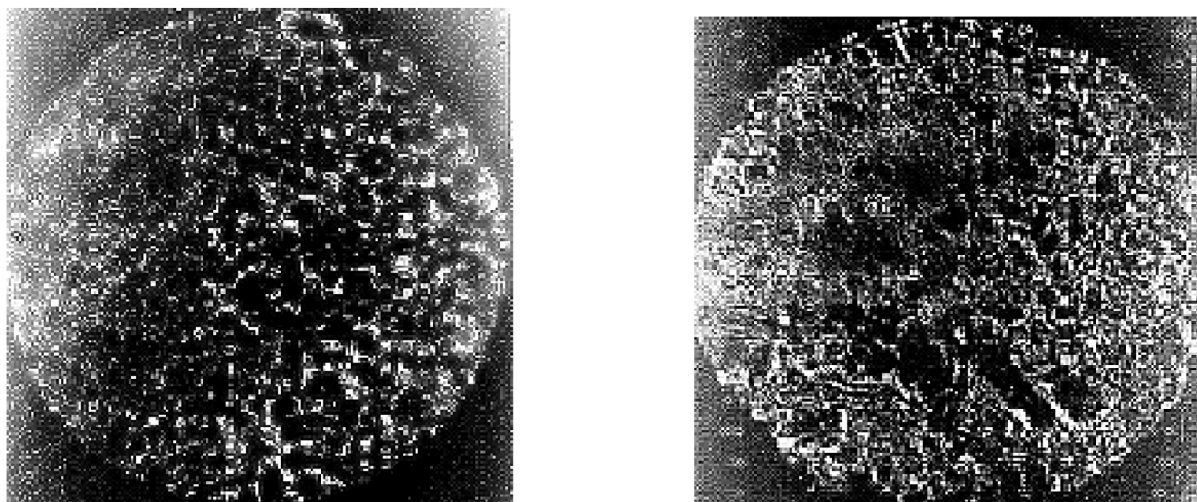
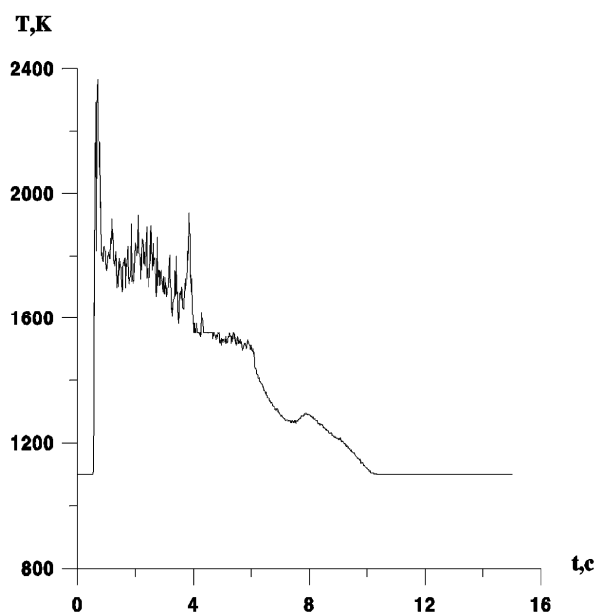


Рис. 5. Фотографии конденсата и вторичных частиц испаренного PbO

Третий – это некий средний механизм между двумя первыми, который отличается большим количеством контактов между частицами, прежде чем происходит их соединение. При лазерном способе образования фрактальных структур наиболее вероятен второй механизм, который отличается более низкой фрактальной размерностью и наиболее рыхлыми агрегатами (рис. 5).

Одновременно с изучением размеров вторичных частиц проводилось исследование динамики температуры поверхности облучаемых образцов $T(t)$ скоростным цветовым пирометром с временным разрешением $\sim 10^{-4}$ с. Данный пирометр определяет температуры в диапазоне от 1100 К до 3000 К, поэтому на рисунке 6 начальный участок процесса соответствует нижнему пределу измерения T .

Рис. 6. Динамика температуры при воздействии МЛИ на PbO при $I = 2 \cdot 10^5$ Вт/м², $t = 15$ с

Анализируя данные экспериментальные зависимости $T(t)$, на кривой можно выделить три характерных температурных участка. На первом участке за время Δt_1 ($\sim 0,5$ с) от начала действия лазерного излучения происходит быстрый нагрев образца до максимальной температуры T_{\max} ; на втором участке за время Δt_2 ($2 \div 8$ с) – выгорание мишени, а температура вещества в зоне воздействия изменяется слабо. Резкий спад температуры наблюдается на третьем участке за время Δt_3 ($2 \div 7$ с) в связи с тем, что прекращается воздействие МЛИ и образец остывает. На третьем участке наблюдается линейная зависимость температуры от времени. При сравнении температурных зависимостей для образцов из различных веществ отмечается идентичный характер поведения функции $T(t)$.

Наибольшие шумы прослеживаются на пике температуры для PbO. Данное явление можно объяснить тем, что в момент воздействия при высокой температуре происходит химическая реакция монооксида свинца и веществ, находящихся в воздухе, с выделением вторичных продуктов в виде парогазового облака при последующей их переcondенсации, а также чистого свинца в кратере воздействия, кристаллизующегося при остывании образца (рис. 7). Для остывшего образца монооксида свинца характерно наличие в кратере пузырька со слоистой структурой стенок и внешней поверхностью, напоминающей кубооктаэдр, усеченный октаэдр или усеченный кубооктаэдр. На поверхности плоского образца при воздействии МЛИ наблюдается явление, подобное искрению, которое фиксируется пирометром.

Эффективным методом исследования веществ, входящих в состав атмосферного аэрозоля, является метод рентгеновского анализа. Он позволяет установить кристаллическую структуру вещества и, соответственно, идентифицировать его по кристаллоструктурным характеристикам.

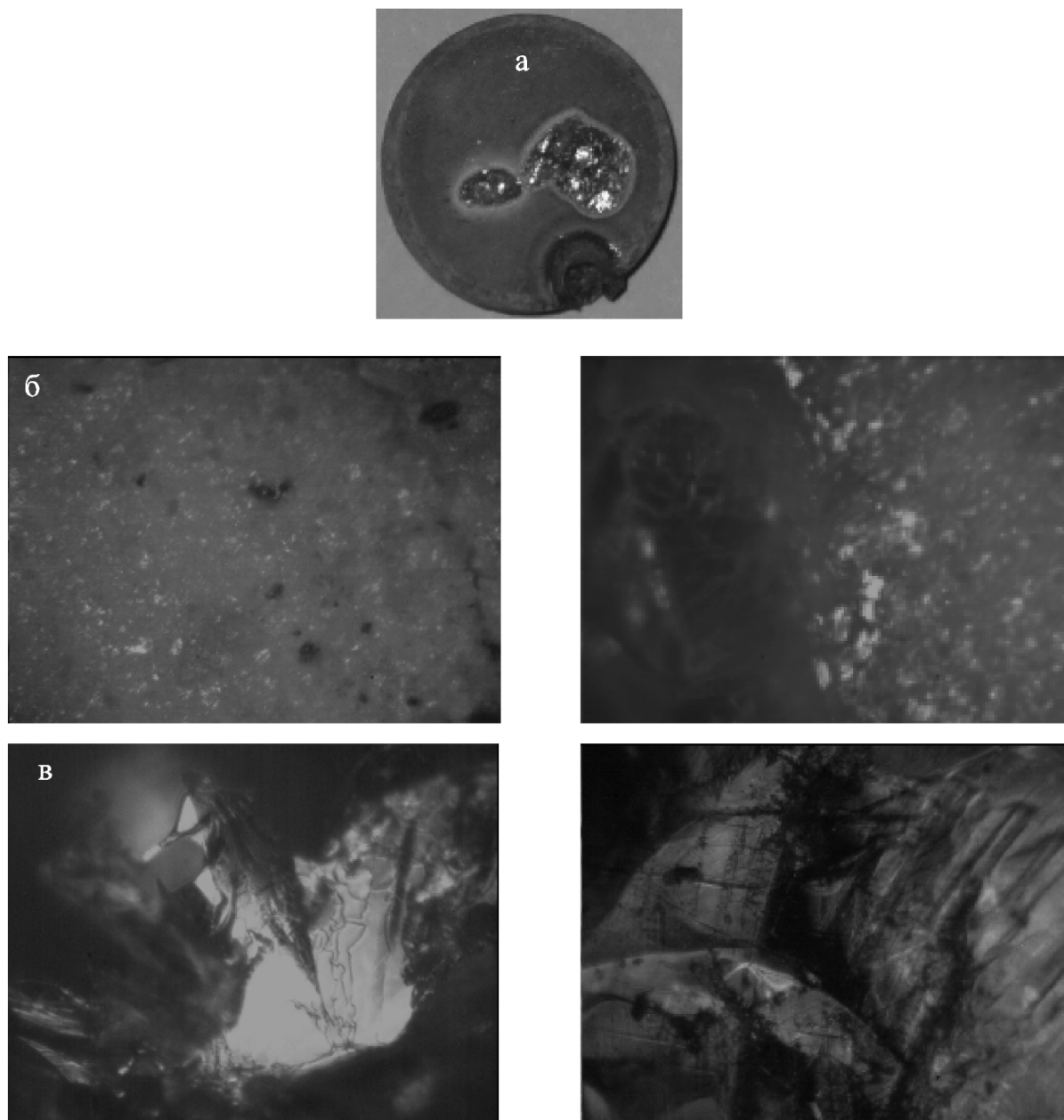


Рис. 7. Фотографии таблетированного образца PbO после воздействия МЛИ:
а – таблетированный образец; *б* – граница воздействия МЛИ; *в* – кристаллы в кратере образца PbO

Результаты применения рентгеновского метода к изучению структурно-фазовых изменений исследуемых веществ, происходящих в результате воздействия МЛИ, приведены на рисунке 8 в виде стрих-диаграммы. Рентгенограммы исследуемых образцов получали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2 с использованием кобальтового излучения при рабочем напряжении 20–30 кВ и анодном токе 10 мА.

Как показывает анализ рентгенограммы, исходные данные оксида свинца (PbO) соответствуют одной из модификаций этого вещества (а именно, желтому оксиду свинца) с небольшими добавле-

ниями красного оксида. В результате лазерного воздействия получившееся вещество имеет структуру желтого оксида свинца. При этом на рентгенограмме наблюдается небольшое количество малоинтенсивных пиков, вызванных, очевидно, наличием примесей. Ввиду малой интенсивности дифракционных пиков идентифицировать состав и характер не представляется возможным.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что в результате воздействия лазерного излучения получившееся вещество либо имеет тот же самый химический состав, что и исходное, возможно, с другой модификацией кристаллической

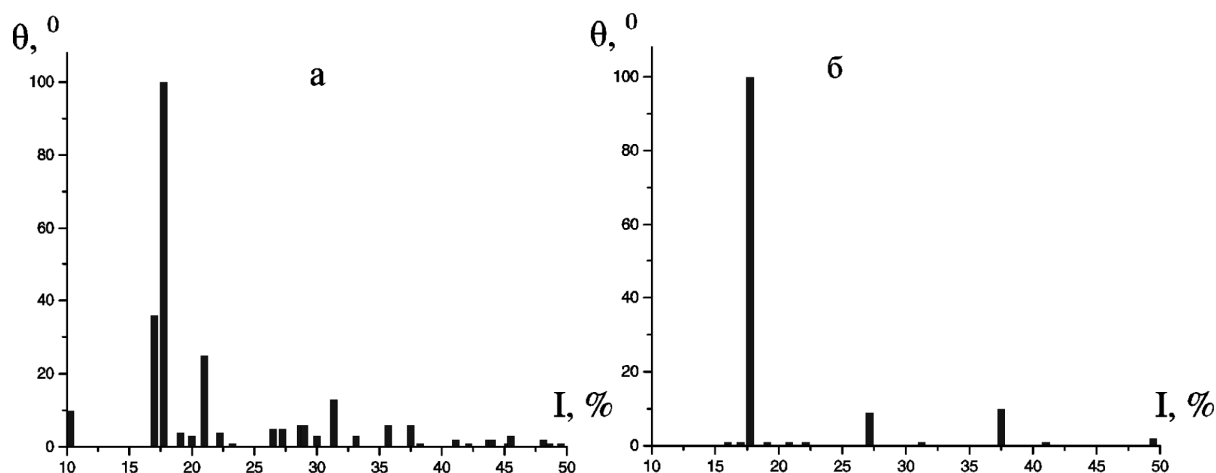


Рис. 8. Штрих-диаграмма монооксида свинца (PbO):
а – до взаимодействия с МЛИ; б – после взаимодействия с МЛИ

структуры, либо представляет собой смесь исходного вещества и продуктов частичного разложения. Необходимо отметить, что для большинства исследованных веществ наблюдается изменение в соотношении интенсивностей дифракционных пиков.

Результаты данных исследований могут быть использованы в лазерных технологиях обработки различных материалов и при анализе твердых атмосферных загрязнений Алтайского края и его промышленных центров.

Библиографический список

1. Миркин А.И. Рентгеноструктурный анализ. Получение и измерение рентгенограмм: справочное руководство. – М., 1976.
2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. – Новосибирск, 1999.
3. Пахомов А.В. Аэрозоли лазерной плазмы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 1990.
4. Букатый В.И., Куприенко Г.В., Соломатин К.В. Моделирование и расчет параметров теплоассорбента, возникающего в окрестностях тугоплавкой частицы // Оптика атмосферы и океана: тез. докл. IV симпозиума. – Томск, 1997.
5. Букатый В.И., Куприенко Г.В., Соломатин К.В. Моделирование процессов испарения тугоплавкой частицы и разлет испаренного вещества в атмосфере: препринт. – Барнаул, 1997.
6. Чистякова Л.К. Нелинейные эффекты при распространении интенсивных лазерных импульсов в аэрозольных средах. Экспериментальные исследования: дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Томск, 2001.
7. Любов Б.Я. Диффузионные изменения дефектной структуры твердых тел. – М., 1985.
8. Смирнов Б.М. Фрактальные кластеры // Успехи физических наук. – 1998. – Т. 149, вып. 2.