



Научная статья  
УДК 551.557.59  
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.3>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗГОНКИ МЕТАЛЛОВ НА ИХ ЛЬДООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ

Бузигит Муссаевич Хучунаев<sup>1</sup>,  
Сафият Омаровна Геккиева<sup>2</sup>,  
Алим Хадисович Будаев<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup> Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360001, Российская Федерация)

<sup>1</sup> [buzgigit@mail.ru](mailto:buzgigit@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6606-5996>

<sup>2</sup> [sgekkieva@list.ru](mailto:sgekkieva@list.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8369-812X>

<sup>3</sup> [budayalim@yandex.ru](mailto:budayalim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3481-8663>

\* Автор, ответственный за переписку

### Аннотация.

Объектом исследования являются кластеры из нановолокон оксидов металлов. В работе приводятся результаты исследования льдообразующих свойств кластеров из нановолокон оксидов цинка и алюминия. В ходе лабораторного моделирования эксперименты проводились в условиях, приближенных к реальным, – в искусственной облачной среде при отрицательных температурах. Использован комплекс аппаратуры, в составе которого малая и большая облачные камеры, которые соединены друг с другом посредством трубы. В малую облачную камеру закладывается реагент и запускается водяной пар. После создания искусственного тумана проводится термическая возгонка реагента и вносится смесь в большую облачную камеру. На дне камеры открываются подложки для сбора частиц реагента образующихся ледяных кристаллов. Затем частицы реагента и ледяные кристаллы изучаются под оптическим и электронным микроскопами. Выявлены особенности синтеза кластеров из нановолокон оксидов металлов и удельного выхода в зависимости от температуры возгонки, относительной влажности в облачной камере. Как показали эксперименты, при возгонке металлов при высоких температурах (800–2000 °С) в присутствии воды образуются кластеры, которые состоят из плотно упакованных наночастиц (нитевидных нановолокон и нанотрубок). Кластеры, попадая в облачную среду, наполняются водой и срабатывают активные зоны, образуются кристаллы льда. По

данным экспериментов оксиды металлов обладают неплохими льдообразующими свойствами, особенно в температурном диапазоне  $-8 \dots -9$  °С. Для оксида цинка этот показатель составляет порядка  $10^{13}$  частиц с 1 грамма. Оксид алюминия проявляет меньшую льдообразующую активность. Результаты экспериментов показывают, что имеется принципиальная возможность и целесообразность использования кластеров из нановолокон оксидов металлов в качестве добавки к штатному пиротехническому составу или как самостоятельных льдообразующих реагентов.

**Ключевые слова:** активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы, оксид цинка, оксид алюминия, кластеры, нановолокна, нанотрубки, удельный выход

**Для цитирования:** Хучунаев Б. М., Геккиева С. О., Будаев А. Х. Исследование воздействия температуры возгонки металлов на их льдообразующие свойства в условиях высокой относительной влажности // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 65–88. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.3>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.11.2024;  
одобрена после рецензирования 23.01.2025;  
принята к публикации 07.02.2025.

**1.6.18. Atmospheric and Climate Sciences  
(Physical and Mathematical Sciences)**  
Research article

**The study of the effect of sublimation  
temperature of metals on their  
ice-forming properties under high relative  
humidity conditions**

**Buzigit M. Khuchunaev<sup>1</sup>,  
Safiyat O. Gekkieva<sup>2</sup>,  
Alim Kh. Budaev<sup>3\*</sup>**

<sup>1,2,3</sup> High-Mountain Geophysical Institute (1, Lenin Ave., Nalchik, 360001, Russian Federation)

<sup>1</sup> [buzgigit@mail.ru](mailto:buzgigit@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6606-5996>

<sup>2</sup> [sgekkieva@list.ru](mailto:sgekkieva@list.ru); <https://orcid.org/0000-0002-8369-812X>

<sup>3</sup> [budayalim@yandex.ru](mailto:budayalim@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3481-8663>

\* Corresponding author

**Abstract.**

Clusters of nanofibers of metal oxides serve the object of the research. The paper studies the ice-forming properties of clusters of nanofibers of zinc, aluminum oxide. During the laboratory simulation, the experiments were carried out in conditions close to real ones – in an artificial cloud environment at subzero temperatures. A set of equipment, which includes small and large cloud chambers connected to each other by means of a pipe, was used. A reagent was placed in a small cloud chamber and water vapor was started. After creating an artificial fog, the reagent was thermally sublimated and the mixture was introduced into a large cloud chamber. At the bottom of the chamber, substrates were opened to collect reagent particles of the formed ice crystals. The reagent particles and ice crystals were then studied under optical and electron microscopes. The features of the synthesis of clusters from nanofibers of metal oxides and the specific yield depending on the sublimation temperature and relative humidity in the cloud chamber are revealed. Experiments have shown that when metals are sublimated at high temperatures (800–2000 °C) in the presence of water, clusters that consist of tightly packed nanoparticles (filamentous nanofibers and nanotubes) are formed. Clusters, falling into a cloudy environment, are filled with water and active zones are triggered, ice crystals are formed. According to experimental data, metal oxides have good ice-forming properties, especially in the temperature range of –8... –9 °C. For zinc oxide, this indicator is about 1013 particles per 1 gram. Aluminum oxide exhibit less ice-forming activity. The experimental results show that there is a fundamental possibility and expediency of using clusters of metal oxide nanofibers as an additive to the standard pyrotechnic composition or as independent ice-forming reagents.

**Keywords:**

weather modification, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles, zinc oxide, aluminum oxide, clusters, nanofibers, nanotubes, specific yield

**For citation:**

Khuchunaev BM, Gekkieva SO, Budaev AKh. The study of the effect of sublimation temperature of metals on their ice-forming properties under high relative humidity conditions. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(1):65-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.3>

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 04.11.2024;  
approved after reviewing 23.01.2025;  
accepted for publication 07.02.2025.

## Введение

Проведение работ по активным воздействиям на облачные процессы сопряжено с немалыми экономическими издержками, связанными как со стоимостью работ, так и с ценой противорадовых изделий (ПГИ). В последние годы отмечается рост стоимости основных компонентов штатного пиротехнического состава АД-1, применяемого в ПГИ типа «Алазань-6» и «Алазань-9». Данный состав используется для воздействия на переохлажденные облака и содержит перхлорат аммония, фенолформальдегидную смолу, дициандиамид, смесь тонкоизмельченных порошков йодидов серебра, калия и меди, в качестве технологических добавок графит, масло индустриальное, технический углерод [1]. Следует также отметить и экологическую сторону проблемы, связанную с токсичностью йодидов металлов, в частности, йодида серебра [2, 3]. При этом по данным исследований [4–6] наночастицы оксидов цинка и алюминия, полученные в среде водяного пара, экологически безвредны.

Отметим, что в настоящее время растет стоимость противорадовых изделий, которая за последние годы выросла в 1,5 раза (рис. 1).

Отметим, что важным параметром эффективности реагентов является быстрое действие реагента, определяемое как количество активных льдообразующих ядер, образующихся в течение 2 минут после возгонки реагента [8]. По данным исследований кинетики активации аэрозолей, генерируемых пиросоставами, наилучшие результаты имели пиросоставы BR-91-У, 50-04-11. Ледяные кристаллы появлялись через 3–5 минут после внесения реагентов в переохлажденную облачную среду [9]. По данным лабораторных экспериментов, проведенных в ВГИ, первые кристаллы появляются через 2 минуты после возгонки цинка или алюминия в среде водяного пара.

Порог кристаллизующего действия йодистого серебра, входящего в состав применяемых в практике активных воздействий льдообразующих реагентов, составляет  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом реагент активно работает при температурах ниже  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [10, 11]. Для уменьшения «непроизводительных» потерь облачной влаги и тем самым повы-

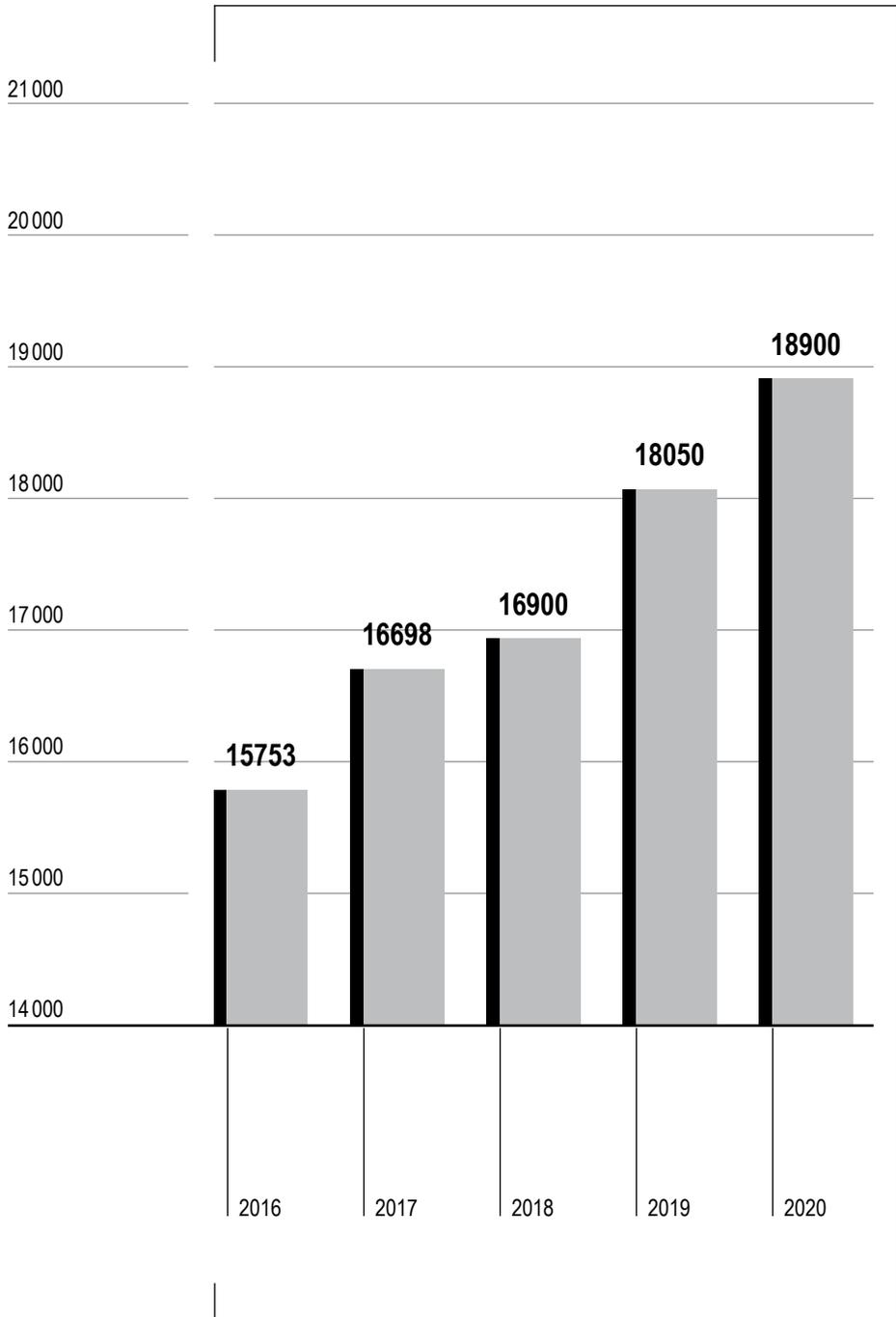
**Рис. 1.****Динамика изменения цены противогорадовых изделий «Алазань-6».**

Fig. 1. Dynamics of price changes of anti-hail products "Alazan-6".  
составлено авторами по данным [7].

Источник:

Source:

compiled by the authors according to data [7].

шения эффективности осадкообразования в практике активных воздействий на облачные процессы необходимы реагенты с более высоким порогом кристаллизации.

Поэтому актуальной становится задача по разработке новых и совершенствованию существующих пиротехнических составов и средств их доставки. Необходимо отметить, что при термической возгонке металлов образуются наноразмерные частицы. При возгонке в среде водяного пара образуются кластеры, которые состоят из нанотрубок и нановолокон. По данным исследований [12–14] нанотрубки малого диаметра, синтезированные в среде водяного пара, мгновенно заполняются водой, которая приобретает в них льдоподобную структуру. Такие трубки являются открытыми и малодефектными. Исследования образования кластеров оксидов металлов открывает перспективу для разработки нового класса эффективных льдообразующих реагентов.

### **Материалы и методы исследований**

Для проведения исследований создан комплекс специальной аппаратуры: большая облачная камера, малая облачная камера, устройство для возгонки реагента, ультразвуковой генератор тумана, весы, оптический микроскоп, пирометр (рис. 2).

В лабораторных экспериментах использован метод для получения наночастиц (нанотрубок), представленный в работе Б.М. Хучунаева и соавторов [15].

На электронных весах взвешивается определенное количество мелкоизмельченного металла и загружается на графитовую подложку устройства для возгонки реагента. Для исследования льдообразующих свойств на дне большой облачной камеры устанавливаются подложки. В малой камере создается облачная среда и проводится высокотемпературная возгонка. На контакты подложки подается ток высоких значений и нагревает графит и реагент (рис. 3).

Термическая возгонка производится в малой камере для исключения влияния нагревания воздуха в камере на процесс образования ледяных кристаллов на продуктах возгонки. С появлением ледяных кристаллов открываются подложки. Подложки поочередно

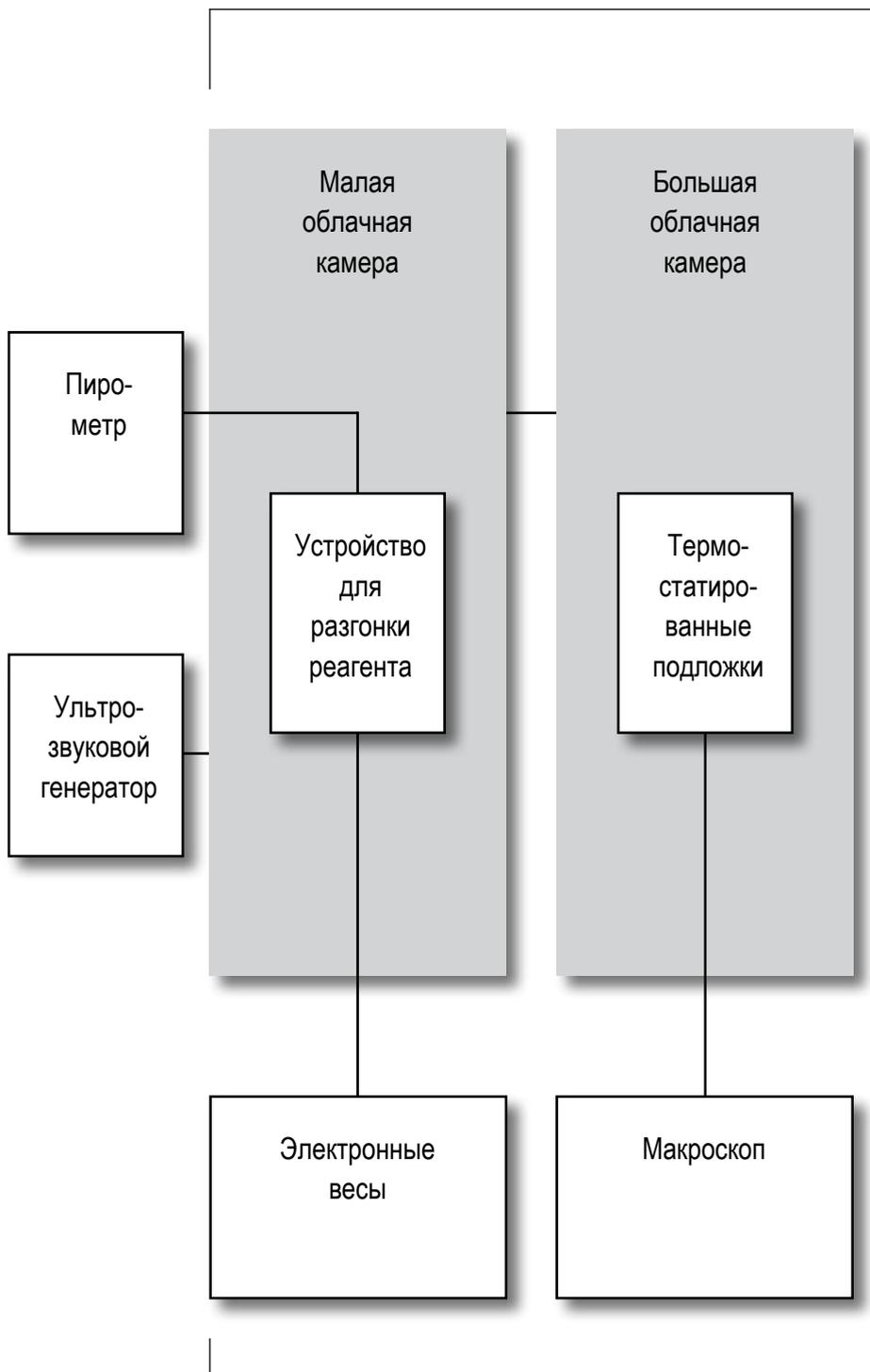


Рис. 2.

**Комплекс аппаратуры для проведения экспериментов.**

Fig. 2. A set of equipment for conducting experiments.

**Рис. 3.****Возгонка металла с графитовой подложки.**

Fig. 3. Sublimation of metal from a graphite substrate.

извлекаются из камеры до завершения выпадения ледяных кристаллов и изучаются под оптическим микроскопом.

Предварительные эксперименты показывают, что при нагревании металлов в присутствии водяного пара до температуры 800–2000 °С образуются кластеры из оксидов металлов, имеющие шаровидную форму. Кластеры состоят из плотно упакованных нитевидных нановолокон и нанотрубок. Расстояние между наночастицами колеблется от 0 до нескольких нм. Диаметр нитевидных нановолокон и нанотрубок составляет 0,8–1,5 нм, длина несколько мкм. Кластеры имеют два вида активной зоны – зона нахождения нанотрубок и нановолокон, и зона промежутков (щелей) между нановолокнами и нанотрубками. Кластеры, попадая в облачную среду, наполняются водой и срабатывают активные зоны, образуются кристаллы льда. Таких активных центров в кластерах сотни и более, по мере роста кристаллов льда они объединяются и образуют большие кристаллы.

По результатам рентгеноструктурных исследований воды в однослойных углеродных нанотрубках [16] были найдены полигональные структуры с числом молекул в них от 5 до 8 в зависимости от диаметра нанотрубок в интервале 1,1 – 1,7 нм. Установлено, что температура таяния ледяных структур составляла –83, –53, +7, +27 °С по мере убывания числа молекул от 8 к 5 в сечении трубок. Эти результаты противоречат ранее установленной тенденции понижения температуры замерзания воды в порах по мере уменьшения их размеров.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Проведены лабораторные исследования механизмов кристаллизации воды в наночастицах (нанотрубках), образующихся при возгонке металлов в присутствии водяного пара.

Алюминий относится к группе лёгких металлов. Температура плавления алюминия – 660 °С, температура кипения – 2518,8 °С. Цинк – переходный металл. Температура плавления цинка – 419,6 °С, температура кипения – 906,2 °С [17].

При возгонке металлов в присутствии водяного пара образуются скопления наночастиц (кластеры) оксидов металлов (рис. 4).

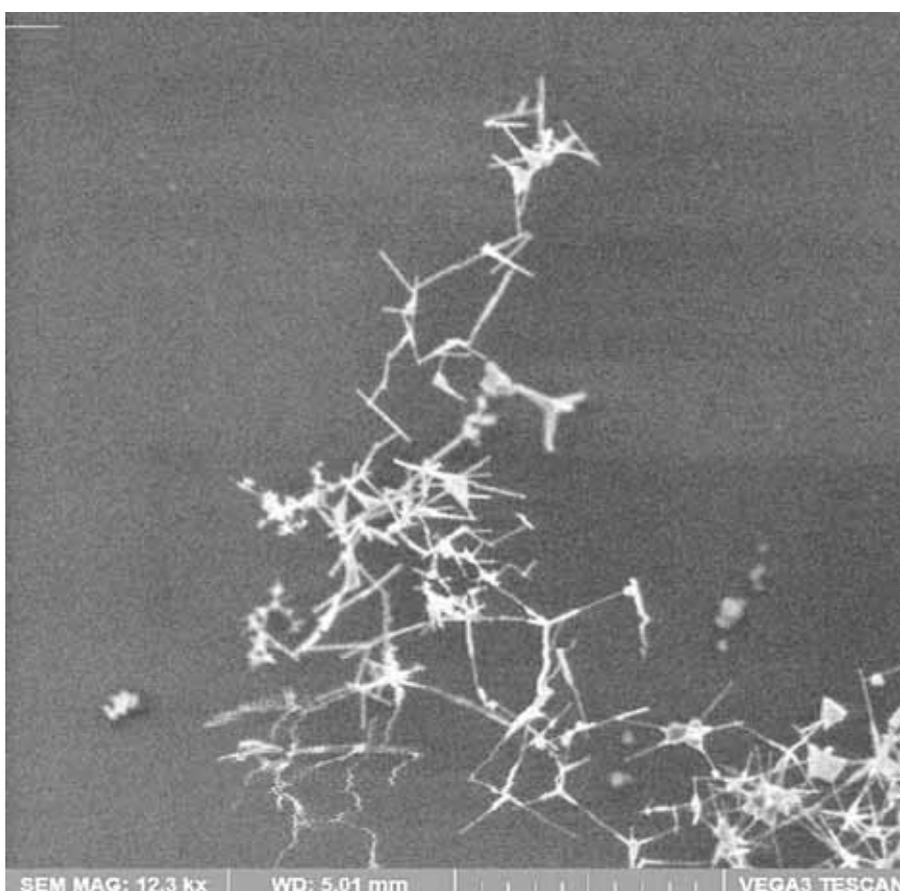


Рис. 4.

Кластер оксида цинка.

Fig. 4. Zinc oxide cluster.

Помимо кластеров в продуктах возгонки встречаются отдельные нитевидные кристаллы. Кластеры, полученные в сухой камере (рис. 5), льдообразующими свойствами не обладают. Водяной пар играет основную роль в образовании льдообразующих наноструктур оксидов металлов.



**Рис. 5.**

**Кластеры оксида цинка при возгонке в сухой камере.**

Fig. 5. Zinc oxide clusters during sublimation in a dry chamber.

Процесс образования нитевидных кристаллов происходит по двум основным механизмам:

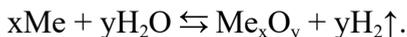
«пар – жидкость – твердое тело»

и

«пар – твердое тело».

В первом случае частицы из газовой среды конденсируются на катализаторе, образуя жидкую каплю. Когда концентрация паров металла в капле достигает предела насыщения, происходит зарождение нитевидного кристалла, который начинает расти. В результате формируется нитевидный кристалл чистого металла.

Эксперименты проводились в присутствии водяного пара, который при возгонке вступает в реакцию с металлом и разлагается:



Когда парциальное давление кислорода увеличивается, начинает действовать второй механизм роста – «пар – твердое тело». Это приводит к образованию нитевидных кристаллов оксида металла.

Исследования показывают, что при возгонке в основном образуются частицы оксида металлов, что позволяет сделать вывод о том, что основной механизм – это механизм «пар – твердое тело».

На рисунках 6 и 7 показаны фотографии нитевидных кристаллов для оксида цинка и оксида алюминия, полученные с помощью оптического микроскопа.

Определены размеры кластеров из наночастиц, образующихся при термической возгонке цинка и алюминия в среде водяного пара. Получено, что с ростом температуры возгонки от 800 до 2000 °С происходит изменение процесса окисления. В таблицах 1 и 2 и на рисунках 8 и 9 показаны зависимости размеров кластеров

**Рис. 6.****Нитевидные кристаллы оксида цинка.**

Fig. 6. Filamentous crystals of zinc oxide.

**Рис. 7.****Нитевидные кристаллы оксида алюминия.**

Fig. 7. Filamentous crystals of aluminum oxide.

Таблица 1. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ КЛАСТЕРОВ ИЗ НАНОЧАСТИЦ  
ОКСИДА ЦИНКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗГОНКИ, %  
Table 1. Dependence of the size of clusters of zinc oxide nanoparticles  
on the sublimation temperature, %

Размер, мкм	560 °С	840 °С	1150 °С	1530 °С
0,1–2,0	0,0	0,0	2,6	33,1
2,1–4,0	0,0	0,0	12,4	30,3
4,1–6,0	0,0	1,0	31,7	15,2
6,1–8,0	0,0	2,0	35,4	3,4
8,1–10,0	1,1	3,6	5,5	3,2
10,1–12,0	3,1	3,0	4,6	3,1
12,1–14,0	3,7	5,2	1,9	2,3
14,1–16,0	20,2	32,6	0,5	3,0
16,1–18,0	33,7	30,7	2,3	3,0
18,1–20,0	38,2	21,9	3,1	3,4

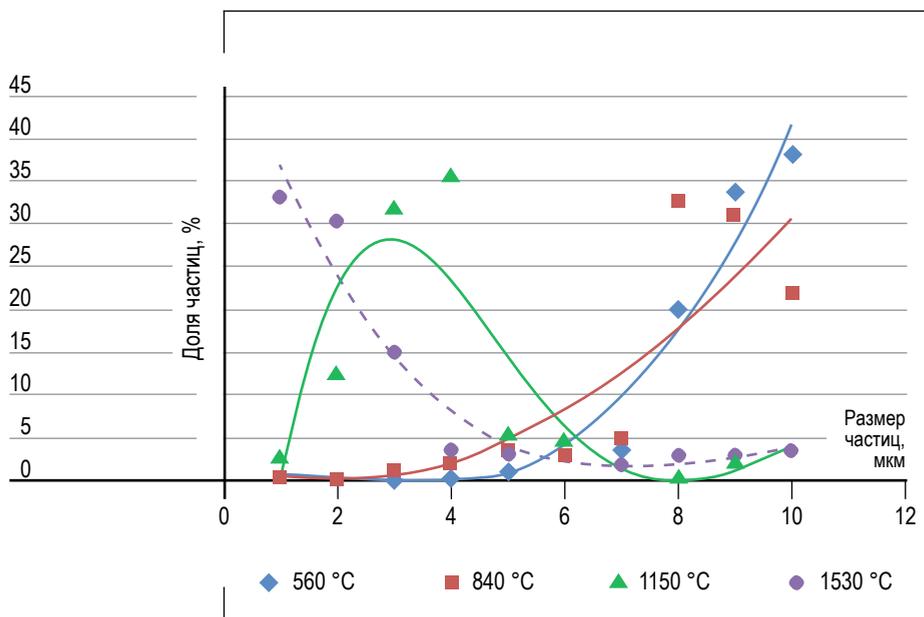


Рис. 8. Зависимость размеров кластеров из наночастиц оксида цинка от температуры возгонки, %.

Fig. 8. Dependence of the size of clusters of zinc oxide nanoparticles on the sublimation temperature, %.

Таблица 2. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ КЛАСТЕРОВ ИЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗГОНКИ, %  
Table 2. Dependence of the size of clusters of aluminum oxide nanoparticles on the sublimation temperature, %

Размер, мкм	840 °C	1150 °C	1530 °C	1980 °C
0,1–2,0	0,0	0,0	0,0	8,6
2,1–4,0	0,0	0,0	0,5	28,1
4,1–6,0	0,0	0,9	2,7	33,5
6,1–8,0	0,0	1,3	7,5	6,5
8,1–10,0	0,0	2,2	17,5	4,4
10,1–12,0	1,1	5,7	20,2	3,3
12,1–14,0	7,9	5,6	32,7	1,6
14,1–16,0	29,0	18,0	9,5	3,6
16,1–18,0	32,6	36,0	6,4	5,0
18,1–20,0	29,4	30,3	3,0	5,4

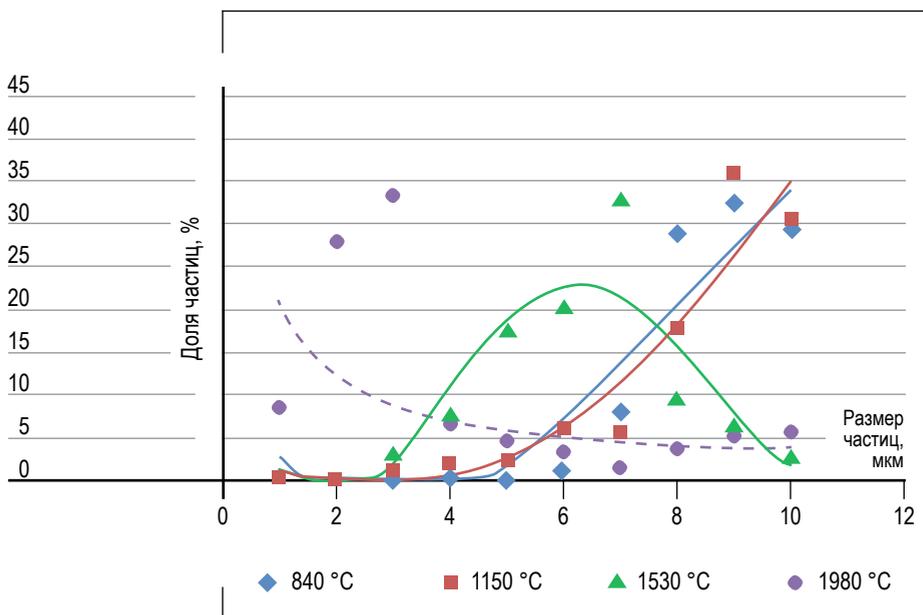


Рис. 9. Зависимость размеров кластеров из наночастиц оксида алюминия от температуры возгонки, %.

Fig. 9. Dependence of the size of clusters of aluminum oxide nanoparticles on the distillation temperature, %.

Таблица 3. УДЕЛЬНЫЙ ВЫХОД НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ  
Table 3. Specific yield of metal oxide nanoparticles

Температура, °С	Цинка оксид, г <sup>-1</sup>	Алюминия оксид, г <sup>-1</sup>	АД-1, г <sup>-1</sup>
-3...-5	$7,0 \times 10^{12}$	$8,3 \times 10^{11}$	$2,7 \times 10^{12}$
-8...-9	$1,2 \times 10^{13}$	$3,1 \times 10^{12}$	$5,9 \times 10^{12}$

из наночастиц оксида цинка и оксида алюминия от температуры подложки.

Как видно из таблиц и рисунков, с увеличением температуры растет доля частиц малого диаметра в продуктах возгонки. Для оксида цинка кластеры из наночастиц размером до 2 мкм появляются при температуре возгонки более 1000 °С. Их количество резко возрастает при температуре около 1500 °С. В температурном диапазоне от 560 до 840 °С преобладают кластеры от 12 до 20 мкм. Кластеры оксида алюминия размером до 2 мкм появляются при температуре почти 2000 °С. При температуре около 1500 °С преобладают кластеры размерами от 8 до 14 мкм. Более крупные кластеры от 12 до 20 мкм отмечаются при температуре возгонки от 840 до 1150 °С. Это связано с тем, что несмотря на более низкую, чем у цинка температуру плавления и окисления, образующийся оксид алюминия более тугоплавкий материал и формирует частицы большего размера.

Лабораторные эксперименты по исследованию влияния размеров кластеров из наночастиц (нанотрубок) оксидов металлов на образование ледяной фазы показали, что оксиды металлов обладают льдообразующими свойствами (табл. 3).

Как видно из таблицы, оксиды цинка и алюминия обладают неплохими льдообразующими свойствами особенно в температурном диапазоне -8...-9 °С.

Наилучшие показатели у оксида цинка, удельный выход льдообразующих ядер в 2–3 больше, чем у штатного пиротехнического состава АД-1 и достигает значений  $10^{13}$  г<sup>-1</sup> (рис. 10).



**Рис. 10.**

**Ледяные кристаллы, сформировавшиеся на кластерах оксида цинка.**

Fig. 10. Ice crystals formed on zinc oxide clusters.

### **Заключение**

Разработана комплексная аппаратура, позволяющая получать кластеры, состоящие из наночастиц оксида цинка и оксида алюминия в процессе возгонки в среде водяного пара. Исследован процесс формирования этих кластеров в зависимости от температуры подложки.

Эксперименты показали, что при высоких температурах (800–2000 °С) и в присутствии воды происходит возгонка металлов, в результате которой образуются кластеры, состоящие из плотно упакованных наночастиц – нитевидных нановолокон и нанотрубок. Когда эти кластеры попадают в облачную среду, они наполняются водой и приобретают льдоподобную структуру. Эта структура служит центром кристаллизации.

С повышением температуры в продуктах возгонки увеличивается количество частиц малого диаметра. В случае оксида цинка кластеры наночастиц размером до 2 мкм начинают формироваться при температуре выше 1000 °С, а их количество резко возрастает при температуре около 1500 °С. В температурном диапазоне от 560 до 840 °С преобладают кластеры размером от 12 до 20 мкм.

Кластеры оксида алюминия размером до 2 мкм появляются при температуре почти 2000 °С. При температуре около 1500 °С преобладают кластеры от 8 до 14 мкм. Более крупные кластеры от 12 до 20 мкм отмечаются в диапазоне температур возгонки от 840 до 1150 °С. Это связано с тем, что несмотря на более низкую температуру плавления и окисления по сравнению с цинком, температура возгонки алюминия выше.

Исследованы льдообразующие свойства кластеров из наночастиц оксида алюминия и оксида цинка. По данным экспериментов оксиды металлов обладают неплохими льдообразующими свойствами, особенно в температурном диапазоне –8...–9 °С. Для оксида цинка этот показатель составляет порядка  $10^{13}$  частиц с 1 грамма. Оксид алюминия проявляет меньшую льдообразующую активность.

Результаты экспериментов показывают, что имеется принципиальная возможность и целесообразность использования кластеров из нановолокон оксидов металлов в качестве добавки к штатному пиротехническому составу или как самостоятельных льдообразующих реагентов.

**Список источников**

1. Хучунаев Б. М., Байсиев Х.-М. Х., Геккиева С. О., Будаев А. Х. Пиротехнический состав для воздействия на переохлажденные облака // Патент на изобретение RU 2714191 С1, 12.02.2020. Заявка № 2019125518 от 12.08.2019.
2. Fajardo C., Costa G., Ortiz L. T., Nande M., Rodríguez-Membibre M. L., Martín M., Sánchez-Fortún S. Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota // *Ecotoxicol Environ Saf.* 2016. Vol. 133. P. 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.028>. Epub 2016 Aug 9. PMID: 27517140.
3. Ватиашвили М. Р. Оценка влияния на окружающую среду йодистого серебра, применяемого в противорадовой защите // *Наука. Инновации. Технологии.* 2018. № 2. С. 7–24.
4. Siddiqi K. S., Rahman A. U., Tajuddin, Husen A. Properties of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Activity Against Microbes // *Nanoscale Res Lett.* 2018. Vol. 13(1). Art. No. 141. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2532-3>. PMID: 29740719; PMCID: PMC5940970.
5. Землянова М. А., Зайцева Н. В., Степанков М. С. Особенности токсического действия нано- и микрочастиц оксида алюминия при многократной ингаляционной экспозиции // *Гигиена и санитария.* 2023. № 102(5). С. 502–508. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-502-508>
6. Francis Arul Prakash, Dushendra Babu G. J., Lavanya M., Vidhya K. Shenbaga, Devasena T. Toxicity studies of aluminium oxide nanoparticles in cell lines // *International Journal of Nanotechnology and Applications.* 2011. No. 5. P. 99–107.
7. Лиев К. Б., Куцев С. А. Анализ экономической эффективности противорадовых работ в Российской Федерации // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* 2021. № 602. С. 124–133.
8. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Барекова М. В., Малкарова А. М. Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик: ВГИ, 2014. С. 314–318.
9. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб: РГГМУ, 2012. 342 с.
10. Калов Х. М. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы /

Х. М. Калов, Р. Х. Калов. Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых (Полиграфсервис и Т), 2010. 219 с.: ил., табл.: 22 см.; ISBN 978-5-93680-409-0.

11. Ким Н. С. и др. Пиротехнический состав для активного воздействия на переохлажденные облака и туманы / Н.С. Ким, А. Г. Шилин, В. С. Поносов, М. С. Резников, И. Н. Шакиров, П. А. Несмеянов, Б. Н. Дубинин, В. Н. Стасенко, В. П. Корнеев // Патент на изобретение RU 2309439 С1, 27.10.2007. Заявка № 2006121150/28 от 14.06.2006.
12. Agrawal K., Shimizu S., Drahusuk L. et al. Observation of extreme phase transition temperatures of water confined inside isolated carbon nanotubes // *Nature Nanotech.* 2017. No. 12. P. 267–273. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.254>
13. Pascal T. A., Goddard W. A., Jung Y. Entropy and the driving force for the filling of carbon nanotubes with water // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. Jul 19. No. 108(29). P. 11794–11798. <https://doi.org/1073/pnas.1108073108>. Epub 2011 Jun 27. PMID: 21709268; PMCID: PMC3141970.
14. Shayeganfar F, Beheshtian J., Shahsavari R. First-Principles Study of Water Nanotubes Captured Inside Carbon / Boron Nitride Nanotubes. *Langmuir.* 2018. No. 34(37). P. 11176–11187. Publication Date: August 23, 2018 <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00856>
15. Хучунаев Б. М. и др. Экспериментальные исследования льдообразующей эффективности пиротехнического состава АД-1 с добавками цинка / Б.М. Хучунаев, Х.-М.Х. Байсиев, С.О. Геккиева, А.Х. Будаев // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* 2020. № 597. С. 51–60.
16. Kyakuno H., Matsuda K., Yahiro H., Inami Y., Fukuoka T., Miyata Y., Yanagi K., Maniwa Y., Kataura H., Saito T., Yumura M., Iijima S. Confined water inside single-walled carbon nanotubes: global phase diagram and effect of finite length // *J Chem Phys.* 2011. No. 134(24). P. 244–501. <https://doi.org/10.1063/1.3593064>. PMID: 21721637.
17. Мишенина Л. Н., Шелковников В. В. Справочные материалы по химии: учеб.-мет. пособие. 2-е изд., доп. и перераб. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 89 с.

## References

1. Khuchunaev BM, Baisiev K-MK, Gekkieva SO, Budaev AKh. Pyrotechnic composition for exposure to supercooled clouds. Patent for invention RU 2714191 C1, 02/12/2020. Application No. 2019125518 dated 08/12/2019. (In Russ.).
2. Fajardo C, Costa G, Ortiz LT, Nande M, Rodríguez-Membibre ML, Martín M, Sánchez-Fortún S. Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2016;133:433-441. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.028>. Epub 2016 Aug 9. PMID: 27517140.
3. Vatiashvili MR. Evaluation of the influence on the environment of argentum iodide applicable in anti-hail protection. *Science. Innovations. Technologies.* 2018;(2):7-24. (In Russ.).
4. Siddiqi KS, Rahman A. U., Tajuddin, Husen A. Properties of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Activity Against Microbes. *Nanoscale Res Lett.* 2018;13(1):141. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2532-3>. PMID: 29740719; PMCID: PMC5940970.
5. Zemlyanova MA., Zaitseva NV, Stepankov MS. Peculiarities of toxic effects produced by aluminum oxide nano- and microparticles under multiple inhalation exposure. *Gigiena i sanitayria = Hygiene and sanitation.* 2023;102(5): P. 502-508. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-502-508>. (In Russ.).
6. Francis Arul Prakash, Dushendra Babu GJ, Lavanya M, Vidhya K Shenbaga, Devasena T. Toxicity studies of aluminum oxide nanoparticles in cell lines. *International Journal of Nanotechnology and Applications.* 2011;(5):99-107.
7. Liev KB, Kushchev SA. Analysis of the economic efficiency of fire-fighting operations in the Russian Federation. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeikova = Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov.* 2021;(602):124-133. (In Russ.).
8. Abshaev MT, Abshaev AM, Barekova MV, Malkarova AM. Guidelines for the organization and conduct of anti-hail works. *Nalchik: VGI;* 2014. P. 314-318. (In Russ.).
9. Koloskov BP, Korneev VP, Shchukin GG. Methods and means of modification of clouds, precipitation and fogs. *St. Petersburg: RSHMU;* 2012. 342 p. (In Russ.).

10. Kalov KM. Physical foundations, methods and means of active influence on hail-thunderstorm clouds and fogs. Ed. by Kalov KM, Kalov RK. Nalchik: Publishing house of M. and V. Kotlyarov (LLC Poligrafservis and T); 2010. 219 p.: ill., table: 22 cm.; ISBN 978-5-93680-409-0. (In Russ.).
11. Kim NS, Shilin AG, Ponosov VS, Reznikov MS, Shakirov IN, Nesmeyanov PA, Dubinin BN, Stasenko VN, Korneev VP. Pyrotechnic composition for active action on supercooled clouds and mists. Patent for invention ru 2309439 C1, 10/27/2007. Application No. 2006121150/28 dated 06/14/2006. (In Russ.).
12. Agrawal K, Shimizu S, Drahushuk L et al. Observation of extreme phase transition temperatures of water confined inside isolated carbon nanotubes. *Nature Nanotech.* 2017;12:267-273. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.254>
13. Pascal TA, Goddard WA, Jung Y. Entropy and the driving force for the filling of carbon nanotubes with water. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011; 108(29):11794-11798. <https://doi.org/10.1073/pnas.1108073108>. Epub 2011 Jun 27. PMID: 21709268; PMCID: PMC3141970.
14. Shayeganfar F, Beheshtian J, Shahsavari R. First-Principles Study of Water Nanotubes Captured Inside Carbon. Boron Nitride Nanotubes. *Langmuir.* 2018;34(37):11176-11187. Publication Date: August 23, 2018 <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00856>
15. Khuchunaev BM, Baisiev K-MK., Gekkieva SO, Budaev AKh. Experimental studies of the ice-forming efficiency of the pyrotechnic composition of AD-1 with zinc additives. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeikova* = Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov. 2020;(597):51-60. (In Russ.).
16. Kyakuno H, Matsuda K, Yahiro H, Inami Y, Fukuoka T, Miyata Y, Yanagi K, Maniwa Y, Kataura H, Saito T, Yumura M, Iijima S. Confined water inside single-walled carbon nanotubes: global phase diagram and effect of finite length. *J Chem Phys.* 2011;134(24):244501. <https://doi.org/10.1063/1.3593064>. PMID: 21721637.
17. Mishenina LN, Shelkovnikov VV. Reference materials on chemistry: textbook-met. stipend. 2nd ed., additional and revised. Tomsk: Publishing House vol. Unita; 2007. 89 p. (In Russ.).

### **Информация об авторах**

**Бузигит Муссаевич Хучунаев** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 6504339248, Researcher ID: Z-5189-2019

**Сафият Омаровна Геккиева** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57214244669, Researcher ID: ABE-7367-2020

**Алим Хадисович Будаев** – младший научный сотрудник лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57214244213, Researcher ID: Z-4534-2019

### **Вклад авторов**

**Бузигит Муссаевич Хучунаев.** Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

**Сафият Омаровна Геккиева.** Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

**Алим Хадисович Будаев.** Проведение исследования – проведение лабораторных исследований, интерпретация и анализ полученных данных, составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта.

### **Information about the authors**

**Buzigit M. Khuchunaev** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Head of Laboratory of Physics of Clouds of the High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 6504339248, Researcher ID: Z-5189-2019

**Safiyat O. Gekkieva** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Associate of Laboratory of Physics of Clouds of the High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57214244669, Researcher ID: ABE-7367-2020

**Alim Kh. Budaev** – Junior Research Associate of Laboratory of Physics of Clouds of the High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57214244213, Researcher ID: Z-4534-2019

### **Contribution of the authors**

**Buzigit M. Khuchunaev.** Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

**Safiyat O. Gekkieva.** Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.

**Alim Kh. Budaev.** Conducting research – conducting laboratory tests, analysis and interpretation, drafting of the manuscript and its final version, approval of the final manuscript.