

25.00.30
УДК 551.557.59

**Хучунаев Б.М.,
Геккиева С.О.,
Будаев А.Х.**

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия,
г. Нальчик

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА УДЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД НА ЧАСТИЦАХ РЕАГЕНТА, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВОЗГОНКЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.12

Введение.

До настоящего времени, несмотря на то, что реагенты давно используются для управления облачными процессами, вопросы, связанные с влиянием электрического поля на их льдообразующие свойства изучены не в полной мере. Исследования, проведенные в этом направлении, показывают, что рост зародышевых частиц зависит от напряженности электрического поля, заряда кристаллизующего ядра и от реализации того или иного механизма роста [1]. Наличие в атмосфере электрического поля и заряда на частицах реагента может влиять на удельный выход льдообразующих ядер при проведении работ по активному воздействию на облачные системы. В связи с этим исследования, связанные с изучением влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов, представляются актуальными и практически значимыми для определения дозировки реагентов при воздействии на облачные процессы.

Материалы и методы
исследования.

В данной статье представлены результаты лабораторных экспериментов по апробированию аппаратуры и методики определения влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов. Методика измерения заряженных частиц основана на использовании отклонения частиц реагента в электрическом поле плоского конденсатора. Предварительные результаты, полученные в ходе исследований, позволили установить, что при возгонке пиротехнических составов происходит зарядение частиц. В качестве рабочего материала для лабораторных исследований были рассмотрены пиротехнические составы, которые используются в противорабовых изделиях (ПГИ) типа «Алазань-6» и «Алазань-9» [2, 3, 4].

Результаты исследования
и их обсуждение.

В статье представлены аппаратура, методика и предварительные результаты исследования влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов. Лабораторные эксперименты были проведены на лабораторных установках ВГИ.

Выводы.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение отрицательного удельного заряда на частицах реагента незначительно увеличивает удельный выход льдообразующих ядер (на 20%) из пиротехнического состава АД-1. При напряженности электрического поля $3,0 \times 10^5$ В/м и удельного заряда на частицах реагента $-8,4 \times 10^{-4}$ Кл/кг удельный выход льдообразующих ядер с пиротех-

нического состава АД–1 в 2,7 раза выше, чем без электрического поля.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы.

**Khuchunaev B.,
Gekkieva S.,
Budaev A.** Federal State Budgetary Institution
«High-Mountain Geophysical Institute»,
Russia, Nalchik

Laboratory Studies of the Effect of the Electric Field Strength on the Specific Charge on Reagent Particles Formed During the Sublimation of Pyrotechnic Compositions

Introduction. Until now, despite the fact that reagents have long been used to control cloudy processes, issues related to the influence of an electric field on their ice-forming properties have not been fully studied. Studies carried out in this direction show that the growth of seed particles depends on the electric field strength, the charge of the crystallizing nucleus, and on the implementation of one or another growth mechanism [1]. The presence of an electric field and a charge on the reagent particles in the atmosphere can affect the specific yield of ice-forming nuclei during work on active action on cloud systems. In this regard, studies related to the study of the effect of the electric field strength on the specific charge on the reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions seem relevant and practically significant for determining the dosage of reagents when exposed to cloudy processes.

Materials and methods of the research. This article presents the results of laboratory experiments on testing the equipment and methods for determining the effect of the electric field strength on the specific charge on the reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions. The method for measuring charged particles is based on the use of the deflection of reagent particles in the electric field of a flat capacitor. The preliminary results obtained in the course of research made it possible to establish that the particles are charged during the sublimation of pyrotechnic compositions. Pyrotechnic compositions used in anti-hail devices such as «Alazan–6» and «Alazan–9» [2, 3, 4] were considered as a working material for laboratory research.

The results of the study and their discussion. The article presents the equipment, methodology and preliminary results of the study of the influence of the electric field strength on the specific charge on the reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions. Laboratory experiments were carried out on High-Mountain Geophysical Institute laboratory facilities.

Conclusions. The experiments have shown that an increase in the negative specific charge on the reagent particles slightly increases the specific yield of ice-forming nuclei (by 20%) from the AD–1 pyrotechnic composition. With an electric field strength of $-8,4 \times 10^{-4}$ V/m and a specific charge on the reagent particles of $3,0 \times 10^5$ C/kg, the specific yield of ice-forming nuclei from the AD–1 pyrotechnic composition is 2.7 times higher than without an electric field.

Key words: electric field strength, active influences, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles.

Введение

В данной статье представлены результаты лабораторных экспериментов по апробированию аппаратуры и методики изучения влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке реагента AgI и пиросостава АД-1.

Методика изучения влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента основана на использовании отклонения частиц реагента в электрическом поле плоского конденсатора. Предварительные результаты, полученные в ходе исследований, позволили установить, что увеличение отрицательного удельного заряда на частицах реагента незначительно увеличивает удельный выход льдообразующих ядер (на 20%) из пиротехнического состава АД-1 [5–9, 10].

Материалы и методы исследования

Проведение работ по активным воздействиям (АВ) на облачные процессы требует учета многих факторов, которые влияют на итоговый результат. В частности, важен анализ метеоусловий, выбор реагента и способов его доставки в облачную среду для достижения оптимального успеха [11, 12]. В связи с этим при разработке и усовершенствовании методов АВ в первую очередь необходимы теоретические исследования и лабораторное моделирование процессов, происходящих в облаках. В частности, при разработке противоголовоградных мероприятий необходимо учитывать наличие электрического поля и заряженных частиц в кучево-дождевом облаке и их влияние на процессы образования ледяной фазы на частицах реагента. Следует отметить, что частицы реагента, вносимого в облако, приобретают электрический заряд за счет контактного механизма и диффузии частиц в электрическом поле [13].

В работе [14] показано влияние электрического поля на процессы кристаллизации капель воды в воздухе. Исследования показали, что при наличии электрического поля замерзание капель воды и дальнейшее остывание замерзших капель происходит быстрее, чем в отсутствие электрического поля. В работах [15, 16] отмечается, что внесение частиц реагента и мелких искусственных кристал-

лов в наиболее водную область облака приводит к частичной или почти полной ликвидации жидких капель. При этом за счет электрокоагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке сокращается на $20 \div 30\%$. Также в ходе численных экспериментов было установлено, что существует положительная обратная связь между ростом массы ледяных частиц и объемом электрического заряда в облаке.

Результаты экспериментальных исследований, приведенные в работах [17, 18], показали, что напряженность электрического поля, заряд кристаллизующего ядра влияют на рост зародышевых частиц из паровой фазы.

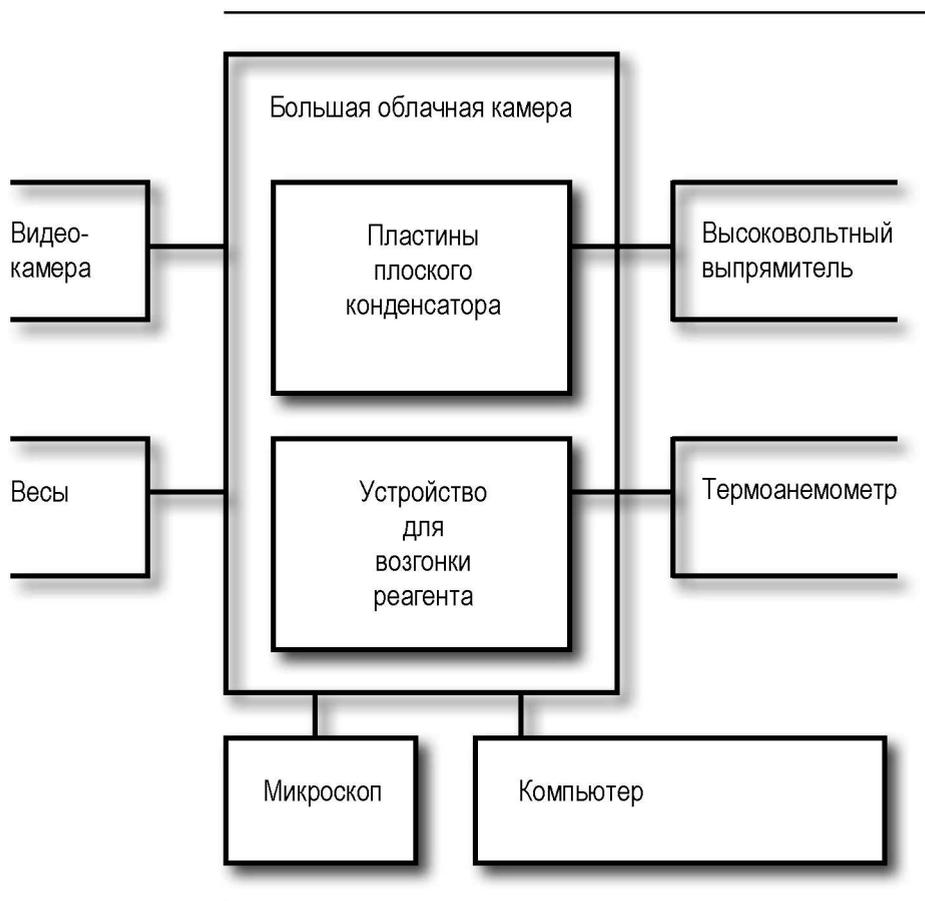


Рис. 1.

Состав типовой установки.

Fig. 1. Typical installation composition.

Для проведения лабораторных экспериментов был создан комплекс специальной аппаратуры, схема которой представлена на рисунке 1.

Аппаратура для определения удельного заряда на частицах реагента, образованных при возгонке пиротехнических составов, должна соответствовать ряду требований: возможность отделить частицы иодида серебра от других продуктов возгонки реагента; сохранение частиц с зарядом для исследования их льдообразующих свойств. Анализ работ, опубликованных по методам измерения заряда на частицах показал, что ни один из методов не позволяет решать приведенные задачи [19, 20, 21].

В комплекс аппаратуры входит большая облачная камера, пластины плоского конденсатора, высоковольтный выпрямитель, устройство для возгонки реагента, термоанемометр, весы, оптический микроскоп, видеокамера [22].

Над устройством для возгонки реагента расположены пластины плоского конденсатора, состоящие из фольгированного гетинакса. На краю каждой пластины закреплена линейка. Пластины конденсатора установлены так, чтобы лодочка устройства возгонки реагента располагалась строго посередине между пластин. Посередине между пластинами конденсатора установлена измерительная часть термоанемометра для измерения скорости движения потока продуктов возгонки реагента. Видеокамера для записи процесса возгонки закреплена на задней стенке большой облачной камеры, ее объектив направлен на область между пластин конденсатора. Для определения областей осаждения продуктов возгонки реагента на пластины конденсатора на каждой пластине закреплены бумажные фильтры от нижней до верхней части каждой пластины.

Методика изучения влияния напряженности электрического поля на льдообразующую эффективность пиротехнического состава АД-1

Предварительно на электронных весах взвешивается определенное количество пиросостава. Он загружается на металлическую лодочку устройства для возгонки реагента. На дно большой облачной камеры устанавливаются термостатированные подложки, накрытые крышками. В камере с помощью ультразвукового па-

рогенератора создается искусственная облачная среда. После чего на пластины конденсатора подается высокое напряжение с высоковольтного выпрямителя. На устройство для возгонки подается ток, происходит диспергирование реагента. После возгонки воздух в камере перемешивается вентилятором и с появлением в поле зрения первых кристалликов поочередно открывают подложки и осаждают на них кристаллы. Каждая подложка изучается в поле оптического микроскопа, подсчитывается количество кристаллов в кадре, затем на компьютере производится расчет удельного выхода [23].

Удельный выход определялся по формуле

$$A = 2,96 \times 10^{15} \frac{n_{кр}}{S_k} \quad (1)$$

где $n_{кр}$ – количество кристаллов в кадре;
 S_k – площадь кадра.

Коэффициент $2,96 \times 10^{15}$ – получен как отношение площади основания большой облачной камеры ($2,96 \times 10^{12}$ мкм²) к массе сожженного реагента (0,001 г).

Результаты исследования и их обсуждение

Серии предварительных экспериментов по апробированию аппаратуры и методики влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиросостава АД-1, показали, что при использовании однополярных выпрямителей частицы успевают перезарядиться и приобретают заряд конденсатора, если выпрямитель полярности «0», «+», то положительный, если «0», «-», то отрицательный.

На рисунке 2 показаны фрагменты отклонения продуктов возгонки пиротехнического состава АД-1 в электрическом поле при использовании однополярных выпрямителей. Как видно из фрагмента возгонки угол в случае Б меньше, следовательно, частицы возгонки в начальный момент заряжены отрицательно. В конце процесса горения, основная часть частиц возгонки заряжены положительно.

При высоких значениях напряженности электрического поля порядка $1,5 \times 10^5$ В/м и выше в процессе возгонки реагента происходил пробой напряжения.

а)



б)



Рис. 2.

Отклонение потока частиц из пиросоства Ад–1 в электрическом поле однополярного выпрямителя (а с полярностью «0», «-»; б – с полярностью «0» и «+»).

Fig. 2. Deviation of particle flux from pyrocomposition Ad–1 in the electric field of a unipolar rectifier (a with polarity «0», «-»; b – with polarity «0» and «+»).

а)



б)

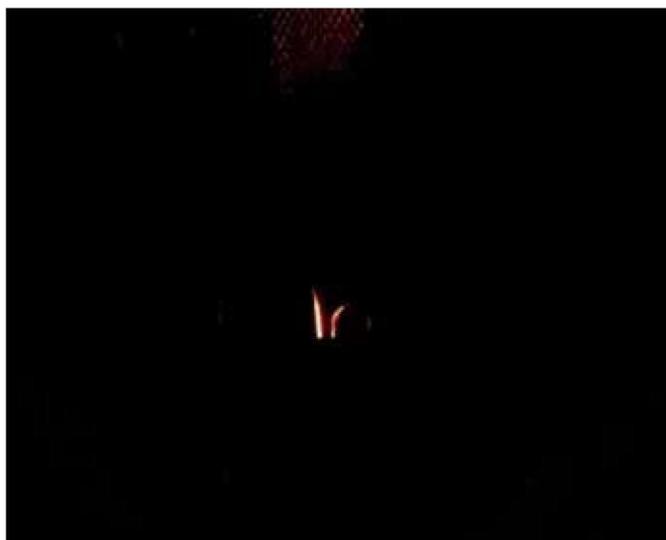


Рис. 3.

Пробой высокого напряжения при возгонке реагента.
Fig. 3. Breakdown of high voltage during the sublimation of the reagent.

В таблице 2 и на рисунке 4 представлена зависимость удельного заряда на частицах реагента от напряженности электрического поля.

Таблица 1. ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА НА ЧАСТИЦАХ РЕАГЕНТА ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
Table 1. Dependence of the specific charge on the reagent particles on the electric field strength

Напряженность электрического поля, кВ/м	Удельн. заряд (q/m), Кл/кг	
	Отриц. заряд. част.	Положит. заряд. част.
6,25	-0,00023287	0,000154194
18,75	-0,00007952	0,000060087
37,5	-0,00008776	0,000021938
56,25	-0,00013415	0,000077
75,0	-0,00140	0,000807
150,0	-0,00083565	0,000222

Таблица 2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА (ПРИ НАПРЯЖЕННОСТЯХ ОДНОПОЛЯРНОГО КОНДЕНСАТОРА «0», «+»)
Table 2. Quantitative values of the electric field strength and specific charge (at the strengths of the unipolar capacitor «0», «+»)

№	Напряженность, В/м	Удельный заряд, Кл/кг	Тип заряда
1.	$6,25 \times 10^4$	$2,3 \times 10^{-4}$	отрицательный
2.	$1,88 \times 10^5$	$7,9 \times 10^{-5}$	отрицательный
3.	$3,75 \times 10^5$	$8,8 \times 10^{-5}$	отрицательный
4.	$5,63 \times 10^5$	$1,3 \times 10^{-4}$	отрицательный

Таблица 3. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА (ПРИ НАПРЯЖЕННОСТЯХ ОДНОПОЛЯРНОГО КОНДЕНСАТОРА «0», «-»)
Table 3. Quantitative values of the electric field strength and specific charge (at the strengths of the unipolar capacitor «0», «-»)

№	Напряженность, В/м	Удельный заряд, Кл/кг	Тип заряда
1.	$-6,25 \times 10^4$	$1,5 \times 10^{-4}$	отрицательный
2.	$-1,88 \times 10^5$	$6,0 \times 10^{-5}$	отрицательный
3.	$-3,75 \times 10^5$	$2,2 \times 10^{-5}$	положительный
4.	$-5,63 \times 10^5$	$7,7 \times 10^{-5}$	положительный

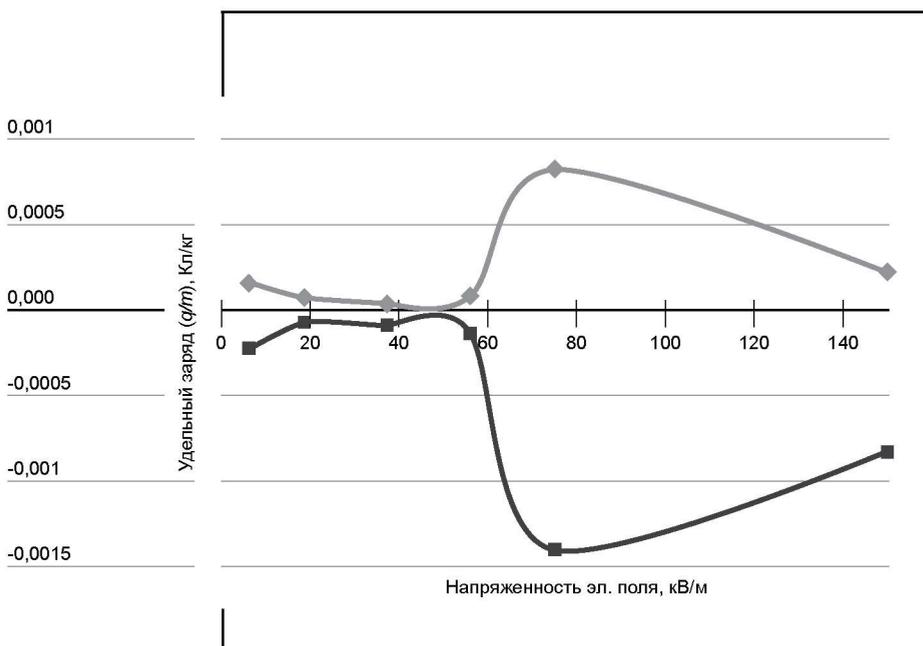


Рис. 4. Зависимость удельного заряда на частицах, образованных при возгонке пиросоостава АД-1 от напряженности электрического поля.

Fig. 4. Dependence of the specific charge on the particles formed during the sublimation of the pyrocomposition of AD-1 on the electric field strength.

Как видно из таблицы 1–3 и вышеприведенных значений, имеется существенная разница в полученных результатах, что, по-видимому, связано с недоучетом подвижности положительно и отрицательно заряженных ионов. Этот вопрос является предметом дальнейших исследований.

Выводы

Исследована связь заряда на частицах реагента с напряженностью однополярных конденсаторов. Получено, что при напряженностях однополярного конденсатора «0», «+» частицы заряжаются отрицательно. При использовании однополярного конденсатора «0», «–» частицы при напряженностях от 0 до $3,2 \times 10^4$ В/м заряжаются отрицательно. При напряженностях от $3,2 \times 10^4$ В/м частицы реагента заряжаются положительно. При использовании однополярного выпрямителя с полярностью «0», «–» с увеличением напряженности электрического поля удельный заряд, приобретенный частицами реагента, уменьшается. При значениях напряженности $-3,1 \times 10^4$ В/м заряд, приобретенный частицами реагента, уменьшается до 0 Кл/м. При дальнейшем росте напряженности меняется знак заряда частиц реагента с отрицательного на положительный и увеличивается его абсолютное значение. Количественные значения напряженности электрического поля и удельного заряда приведены в таблицах 1–3.

Зарядка частиц реагента производилась по ранее разработанной методике, которая основана на использовании плоского конденсатора с однополярными источниками питания. В экспериментах удельный заряд частиц изменялся от $-1,4 \times 10^{-3}$ Кл/кг до $8,1 \times 10^{-4}$ Кл/кг. Напряженность электрического поля изменялась от 0 В/м до $3,0 \times 10^5$ В/м. Дальнейшее повышение напряженности электрического поля приводило к пробоем между пластинами плоского конденсатора.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение отрицательного удельного заряда на частицах реагента незначительно увеличивает удельный выход льдообразующих ядер (на 20%) из пиротехнического состава АД–1. При напряженности электричес-

кого поля $3,0 \times 10^5$ В/м и удельного заряда на частицах реагента $-8,4 \times 10^{-4}$ Кл/кг удельный выход льдообразующих ядер с пиротехнического состава АД-1 в 2,7 раза выше, чем без электрического поля.

Библиографический список

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т. и др. Руководство по организации и проведению противогололедных работ. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Нальчик, 2014. С. 315.
2. Хучунаев Б.М., Байсиев Х.-М. Х., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Экспериментальные исследования льдообразующей эффективности пиротехнического состава АД-1 с добавками цинка // Труды ГГО. Вып. 597. 2020. С. 51–60.
3. Khuchunaev B. M., Baysiev Kh-M. Kh, Gekkieva S. O., Budaev A. Kh. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of silver iodide AgI particles and Zinc Oxide. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1083 012097
4. Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Аппаратура, методика и предварительные результаты измерения удельного заряда на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов // Труды ГГО. Вып. 599, 2020. С. 128–139.
5. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. С. 271.
6. Закинян Р.Г. Кинетика роста льда на поверхностях предметов различных форм, помещенных в поток переохлажденного аэрозоля // Материалы V научно-технической конференции СК ГТУ, 2001. С. 20.
7. Wegener A. Thermodynamic der Atmosphäre. Leipzig, 1911. P. 311.
8. Вопросы физики облаков. Сборник избранных статей ГГО. Астерион, СПб., 2008. С. 98–106.
9. Емельянов В.Н., Несмеянов П.А., Эрландц Н.Ю., Шакиров И.Н. Результаты разработки новых пиротехнических составов льдообразующего аэрозоля для средств активного

- воздействия на облака // Труды юбилейной конф., посвящ. 40-летию начала производств. работ по защите от града. Нальчик: Печатный двор, 2011. С. 259–260.
10. Vonnegut B. Experiments with silver-iodide smokes in the natural atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1950. Vol. 31.
 11. Айсин Д.Р., Гальперин С.М., Козлов В.Н., Щукин Г.Г. Активные воздействия на облака и осадки в Санкт-Петербурге во время проведения саммита «Группы восьми» // Труды ГГО. Вып. 556. 2007. С. 215–229.
 12. Bedritsky A. and Chernikov A. Cloud seeding to protect Moscow from rain on 9 May 1995 // *WMO bulletin*, 1996. Vol. 45. №1. P. 60–64.
 13. Синькевич А.А., Довгалюк Ю.А., Степаненко В.Д. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния коронного разряда на электризацию частиц и фазовые переходы воды в облаках (обзор работ ГГО). 50 лет отделу физики облаков ГГО // Сборник избранных статей ГГО. Вопросы физики облаков. Астерион, Санкт-Петербург. 2008. С. 316–334.
 14. Balkarova S.B., Sozaeva L.T., Gekkieva S.O. The influence of the electric field on the crystallization of water droplets in the air flow. *International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, Kislovodsk, 01-05 октября 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 044021. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044021.*
 15. Шаповалов В. А. Численное моделирование формирования градин в облаках при естественном развитии и активном воздействии кристаллизующим реагентом // *Наука. Инновации. Технологии.* №3. 2018. С. 227–239.
 16. Shapovalov V.A., Shapovalov A.V., Sherieva M.A. Three-dimensional mathematical model of a convective cloud with detailed account for the thermodynamic, microphysical and electric processes. 8th All-Russian Conference on Atmospheric Electricity Nalchik, 23–27 сентября 2019. *J. of Phys. Conf. Ser. 8. «VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity».* 2020. 1604 (2020) 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1604/1/012013.
 17. Першина Т.А., Шлыков В.В., Авраменко Р.Ф., Николаева В.И., Щукин Г.Г., Стасенко В.Н. Исследование влияния вы-

- соковольтного высокочастотного разряда на искусственный туман // Труды НИЦ ДЗА. Вып. 1 (546). 1997. С. 62–67.
18. Красногорская Н. В. Влияние электрических сил на коагуляцию частиц сравнимых размеров // ИАН СССР. ФАО. Т. 1. 1965. С. 339–345.
 19. Barthe C., Chong M., Pinty J., Bovalo C., and Escobar J. CELLS v1.0: Updated and Parallelized Version of an Electrical Scheme to Simulate Multiple Electrified Clouds and Flashes over Large Domains, *Geoscientific Model Development*, vol. 5, issue. 1. P. 167–184. 2012. DOI: 10.5194/gmd-5-167-2012.
 20. Benmoshe N., Pinsky M., Pokrovsky A., Khain A. P. Turbulent Effects on Cloud Microstructure and Precipitation of Deep Convective Clouds as Seen from Simulations with a 2-D Spectral Microphysics Cloud Model, *J. Geophys. Res.*, 117, D06220, 2012. DOI: 10.1029/2011JD016603.
 21. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество [Текст] / пер с англ.; под ред. [и с послесл.] д-ра физ.-мат. наук И.М. Имянитова. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1974. 421 с.
 22. Хучунаев Б. М., Панаэтов В. П., Хучунаев А. Б. Исследование образования нанотрубок оксида цинка // Материалы Международного симпозиума, посвященного 20-летию создания ФГБУ науки Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2013. С. 61–63.
 23. Хучунаев Б. М., Панаэтов В. П., Хучунаев А. Б. Аппаратура и методика лабораторного моделирования начальной стадии роста града // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2010. № 4 (158). С. 64–67.

References

1. Abshaev A. M., Abshaev M. T. et al. Guidelines for organizing and carrying out anti-hail works. Federal Service for Hydro-meteorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Nalchik, 2014. 315 p.
2. Khuchunaev B.M., Baisiev H.-M. Kh., Gekkieva S.O., Budaev A.Kh. Experimental studies of the ice-forming efficiency of the AD-1 pyrotechnic composition with Zinc additions. Collection «Proceedings of the MGO». Issue 597. 2020. 51–60 p.
3. Khuchunaev B.M., Baysiev Kh.-M.Kh, Gekkieva S.O., Budaev

- A. Kh. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of Silver Iodide AgI particles and Zinc Oxide. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1083 012097.
4. Khuchunaev B.M., Gekkieva S.O., Budaev A.Kh. Apparatus, methodology and preliminary results of measuring the specific charge on reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions. Collection «Proceedings of the MGO». Issue 599, 2020. P. 128–139.
 5. Nikandrov V.Ya. Artificial influences on clouds and fogs. L.: Hydrometeoizdat, 1959, 271 p.
 6. Zakinyan R.G. Kinetics of ice growth on the surfaces of objects of various shapes placed in a stream of supercooled aerosol // Proceedings of the V scientific and technical conference. «North Caucasian Mining and Metallurgical Institute», 2001. 20 p.
 7. Wegener A. Thermodynamic der Atmosphäre. Leipzig, 1911. P. 311.
 8. Problems of the Cloud Physics. Collection of selected articles of the MGO. Asterion, SPb., 2008. P. 98–106.
 9. Emelyanov V.N., Nesmeyanov P.A., Erlandts N.Yu., Shakirov I.N. Results of the development of new pyrotechnic compositions of ice-forming aerosol for means of weather modification // Proceedings of the jubilee conference, dedicated 40th Anniversary of the start of production the works on protection from hail. Nalchik: Print Court, 2011. P. 259–260.
 10. Vonnegut B. Experiments with Silver Iodide smokes in the natural atmosphere. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1950. Vol. 31.
 11. Aisin D.R., Galperin S.M., Kozlov V.N., Shchukin G.G. Weather modification in St. Petersburg during the G8 summit // Proceedings of the MGO. Issue 556. 2007. P. 215–229.
 12. Bedritsky A. and Chernikov A. Cloud seeding to protect Moscow from rain on 9 May 1995 // WMO bulletin. 1996. Vol. 45. №1. P. 60–64.
 13. Sinkevich A. A., Dovgalyuk Yu. A., Stepanenko V. D. Results of theoretical and experimental studies of the effect of corona discharge on electrification of particles and phase transitions of water in clouds (review of the work of the MGO). 50th An-

- niversary of the Department of Cloud Physics of the MGO // Collection of selected articles of the MGO. Problems of the Cloud Physics. Asterion, St.Petersburg. 2008. P. 316–334.
14. Balkarova S. B., Sozaeva L.T., Gekkieva S.O. The influence of the electric field on the crystallization of water droplets in the air flow. International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, Kislovodsk, October 01-05, 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 044021. DOI: 10.1088/1757–899X/698/4/044021.
 15. Shapovalov V.A. Numerical simulation of the formation of hailstones in the clouds at the natural development and at the active influence with the help of crystallizing reagent // Science. Innovation. Technologies. 2016. №3. P. 227–239.
 16. Shapovalov V.A., Shapovalov A.V., Sherieva M.A. Three-dimensional mathematical model of a convective cloud with detailed account for the thermodynamic, microphysical and electric processes. 8th All-Russian Conference on Atmospheric Electricity Nalchik, 23–27 сентября 2019. J. of Phys. Conf. Ser. 8. «VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity». 2020. 1604 (2020) 012013. DOI:10.1088/1742–6596/1604/1/012013
 17. Pershina T.A., Shlykov V.V., Avramenko R.F., Nikolaeva V.I., Shchukin G.G., Stasenko V.N. Investigation of the influence of high-voltage high-frequency discharge on artificial fog // Proceedings of the Scientific Research Center of DSA, Issue 1 (546). 1997. P. 62–67.
 18. Krasnogorskaya NV Influence of electrical forces on the coagulation of particles of comparable sizes // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, USSR. FAO. Vol. 1. 1965. P. 339–345.
 19. Barthe C., Chong M., Pinty J., Bovalo C., and Escobar J. CELLS v1.0: Updated and Parallelized Version of an Electrical Scheme to Simulate Multiple Electrified Clouds and Flashes over Large Domains, Geoscientific Model Development, Vol. 5, Issue. 1. P. 167–184. 2012. DOI: 10.5194/gmd–5–167–2012
 20. Benmoshe N., Pinsky M., Pokrovsky A., Khain A. P. Turbulent Effects on Cloud Microstructure and Precipitation of Deep Convective Clouds as Seen from Simulations with a 2-D

- Spectral Microphysics Cloud Model, *J. Geophys. Res.*, 117, D06220, 2012. DOI: 10.1029/2011JD016603.
21. Chalmers J. A. Atmospheric electricity / Transl. from English and ed. [and with afterword. Dr. Phys.-Math. Sciences I.M. Imyanitov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974. 421 p.
 22. Khuchunaev B. M., Panaetov V. P., Khuchunaev A. B. Investigation of the formation of Zinc Oxide nanotubes // Materials of the International Symposium dedicated to the 20th Anniversary of the establishment of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013. P. 61–63.
 23. Khuchunaev B. M., Panaetov V. P., Khuchunaev A. B. Equipment and methods of laboratory modeling of the initial stage of the growth of the city // Bulletin of higher education institutes. North Caucasus region. № 4 (158), 2010. P. 64–67.

Поступило в редакцию 02.11.2021,

принята к публикации 18.12.2021

Сведения об авторах

Хучунаев Бузигит Муссаевич, докт. физ.- мат. наук, зав. лабор. МФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
Researcher ID 6504339248
e-mail: buzgigit@mail.ru

Геккиева Сафият Омаровна, канд. ф.-м.н., СНС ЛМФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
Researcher ID 57214244669
тел. 8(928) 69-36-444, e-mail: sgekkieva@list.ru

Будаев Алим Хадисович, МНС лабор.
МФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
e-mail: budayalim@yandex.ru

About authors

- Khuchunaev** Buzigit, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Department of cloud physics, Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, KBR, 360000, Nalchik, Lenin Ave., 2, Researcher ID 6504339248, e-mail: buzgigit@mail.ru
- Gekkieva** Safiyat, candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Microphysics of Clouds of the Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, KBR, 360000, Nalchik, Lenin Ave., 2, Researcher ID 57214244669. Phone: 8(928) 69-36-444, sgekkieva@list.ru
- Budaev** Alim Khadisovich, junior researcher Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, KBR, 360000, Nalchik, Lenin Ave., 2, e-mail: budayalim@yandex.ru

Т

Издательство Северо-Кавказского федерального университета. г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная верстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 20.12.2021 г. Выход в свет 27.12.2021 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,78. Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». 355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.