

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84>

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЛЬДООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА АД-1

Научная статья

Геккиева С.О.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-8369-812X;¹ Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (sgekkieva[at]list.ru)

Аннотация

В данной статье представлена аппаратура, методика и результаты лабораторных исследований влияния электрического поля на льдообразующие свойства высокоэффективного льдообразующего состава «АД-1» с 8% содержанием AgI, который используется для снаряжения противогололедных комплексов третьего поколения семейства «Алазань». Для проведения лабораторных экспериментов был создан специальный комплекс аппаратуры и использован метод заряжения частиц реагента в электрическом поле плоского конденсатора.

Представлены результаты испытаний льдообразующей составляющей АД-1 при наличии электрического поля. Согласно проведенным исследованиям следует, что наличие электрического поля понижает выход льдообразующих частиц во всем диапазоне принятых температур, начиная от минус 3°C до минус 12°C. Получено, что удельный выход льдообразующих ядер при увеличении напряженности электрического поля от 100 до 300 В/см уменьшается в три раза.

В экспериментах без электрического поля наоборот, наблюдается увеличение льдообразующих частиц с максимальным выходом в интервале температур от минус 11°C до минус 12°C с дальнейшим убыванием и резким скачком при минус 14°C.

Ключевые слова: активные воздействия, пиротехнический состав АД-1, реагент, льдообразующие частицы, электричество.

RESULTS OF LABORATORY STUDIES OF THE EFFECT OF AN ELECTRIC FIELD ON THE ICE-FORMING PROPERTIES OF THE AD-1 PYROTECHNIC COMPOSITION

Research article

Gekkieva S.O.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-8369-812X;¹ High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

* Corresponding author (sgekkieva[at]list.ru)

Abstract

This article presents the equipment, methodology, and results of laboratory studies on the effect of an electric field on the ice-forming properties of the highly effective ice-forming composition 'AD-1' with 8% AgI content, which is used to equip third-generation anti-hail complexes of the 'Alazan' family. A special set of equipment was created for conducting laboratory experiments, and a method of charging reagent particles in the electric field of a flat capacitor was used.

The results of tests on the ice-forming component AD-1 in the presence of an electric field are presented. According to the conducted research, the presence of an electric field reduces the yield of ice-forming particles across the entire range of accepted temperatures, from minus 3 °C to minus 12 °C. It was found that the specific yield of ice-forming nuclei decreases threefold when the electric field strength increases from 100 to 300 V/cm.

In experiments without an electric field, on the contrary, an increase in ice-forming particles is observed, with maximum yield in the temperature range from minus 11°C to minus 12°C, followed by a further decrease and a sharp jump at minus 14°C.

Keywords: active effects, AD-1 pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles, electricity.

Введение

Известно, что в электрических явлениях, сопутствующих термодинамически необратимым фазовым переходам в облаке, происходит сильнейшая электризация поверхности как реагентов, так и образующихся частиц. Между тем есть основания считать, что их роль значительна [1]. В работах [2], [3] анализируется увеличение электрической активности в конвективных облаках после проведения воздействий льдообразующим кристаллизующим реагентом AgI. Анализ свидетельствует об увеличении электрической активности в облаках после проведения активных воздействий на основе частоты молниевых разрядов, которая рассчитывалась по радиолокационным характеристикам исследуемых облаков.

В настоящее время совершенствуются реагенты и технические средства для активных воздействий (АВ) [4], [5], [6], [7]. Отмечено, что при проведении АВ на облачные системы, наличие в атмосфере электрического поля и заряда на частицах реагента может влиять на удельный выход льдообразующих ядер. В данной статье представлен анализ результатов, полученных лабораторным путем.

Методы и принципы исследования

Для изучения влияния электрического поля на льдообразующие свойства пиротехнического состава АД-1 и его льдообразующие свойства был создан комплекс аппаратуры. В данный комплекс входит большая облачная камера, устройство для возгонки реагента, пластины плоского конденсатора, высоковольтный выпрямитель, электронные весы Adventurer, аппаратура для регистрации ледяных кристаллов, в состав которой входит оптический микроскоп Motic. Пластины конденсатора, состоящие из меди, расположены на вертикальных стойках, закрепленных на изолированной поверхности. Расстояние между пластинами 0,04 м. Лабораторные исследования проводились при относительной влажности 100% и в диапазоне температур от -3 до -14 °C, уровень влажности и температуры в облачной камере контролировался с помощью термогигрометра ТКА-ПКМ 24.

Предварительно на электронных весах взвешивается определенное количество реагента. Он закладывается на пластинку слюды над спиралью устройства для возгонки реагента. На пластины конденсатора с высоковольтного выпрямителя подается напряжение, после чего на контакты нихромовой спирали устройства для возгонки реагента подается напряжение. Спираль раскаляется и диспергирует реагент. Процесс возгонки записывается на видео. После возгонки отключается электрическое поле, воздух в камере перемешивается вентилятором. Облачная камера охлаждается до заданной температуры, из устройства для создания искусственной облачной среды запускается пар. После создания искусственного облака в камеру вносится шприцем объемом 400 мл проба аэрозоля из камеры возгонки. Воздух в камере перемешивается. С появлением кристаллов открывают подложки. После осаждения кристаллов подложки накрывают, извлекают из камеры и изучают под оптическим микроскопом.

Выход активных частиц A на единицу массы переведенного в аэрозоль вещества ($г^{-1}$) после запуска реагента определяется по формуле:

$$A = nVS/svm,$$

где:

n — число ледяных кристаллов в поле зрения микроскопа;

V — объем аэрозольной камеры, $см^3$;

S — площадь пола облачной камеры, $см^2$;

s — площадь поля зрения микроскопа, $см^2$;

v — объем пробы аэрозоля, $см^3$;

m — масса переведенного в аэрозоль вещества, $г$.

В качестве верхнего предела может рассматриваться теоретический выход активных частиц для наиболее активного льдообразующего вещества — йодистого серебра — при наименьшей температуре измерения минус 25 °C, равный $10^{19} г^{-1}$.

Основные результаты

Эксперименты были проведены в камере возгонки при напряженности электрического поля 300 В/см, а также без поля. Результаты экспериментов приведены в таблицах 1–2 и на рисунке 1.

Таблица 1 - Удельный выход кристаллов при наличии электрического поля

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.1>

Расстояние между пластинами, м	Температура в камере °C	Масса реагента, г	Напряжение, кВ	Удельный выход, $\times 10^{12} \times n_{\text{кр}} / \Gamma_{\text{реак}}$
0,04	-14,0	0,01	9,0	2,4
0,04	-13,5	0,01	5,0	2,3
0,04	-13,0	0,01	5,0	2,6
0,04	-12,5	0,01	5,0	2,3

Расстояние между пластинами, м	Температура в камере °C	Масса реагента, г	Напряжение, кВ	Удельный выход, $\times 10^{12} \times n_{кр}/\Gamma_{реак}$
0,04	–12,0	0,01	2,5	2,6
0,04	–11,5	0,01	5,0	2,9
0,04	–11,0	0,01	5,0	2,2
0,04	–10,5	0,01	9,0	2,1
0,04	–10,0	0,01	5,0	2,3

Таблица 2 - Удельный выход кристаллов при отсутствии электрического поля

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.2>

Температура в камере °C	Масса реагента, г	Удельный выход, $\times 10^{12} \text{ н}_{\text{кр}}/\text{г}_{\text{реаг}}$
-14,0	0,01	4,1
-13,5	0,01	4,0
-13,0	0,01	3,0
-12,5	0,01	2,8
-12,0	0,01	3,6
-11,5	0,01	3,8
-11,0	0,01	3,0
-10,5	0,01	2,0
-10,0	0,01	2,1

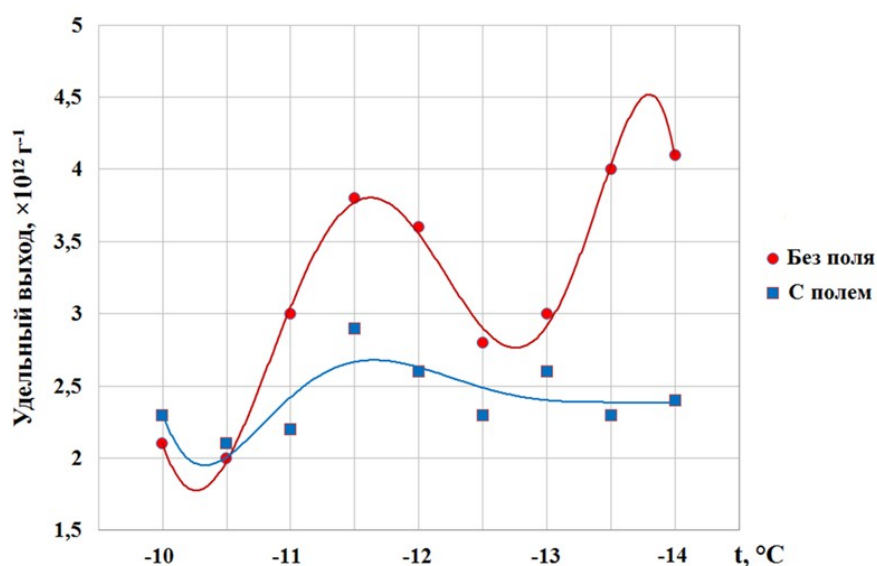


Рисунок 1 - Зависимость удельного выхода кристаллов от температуры при наличии (300 В/см) и отсутствии электрического поля при возгонке реагента

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.3>

Из представленного графика видно, что в экспериментах без электрического поля максимальный выход льдообразующих частиц обеспечивается в интервале температур от минус 11 до минус 12°C с дальнейшим убыванием и резким скачком при минус 14°C. В экспериментах при наличии электрического поля удельный выход кристаллов не имеет ярко выраженных максимумов. Из приведенных выше материалов следует, что наличие электрического поля приводит к ослаблению льдообразующих свойств опытного материала.

При возгонке реагента в электрическом поле, создаваемом однополярным выпрямителем, отклонение потока реагента происходило преимущественно на заземленную пластину (рисунок 2).

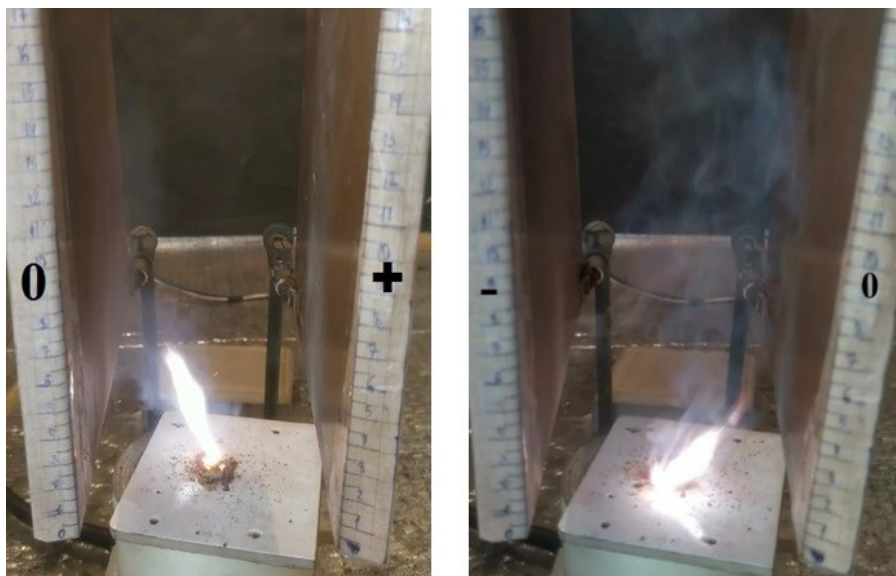


Рисунок 2 - Отклонение потока частиц реагента при возгонке с помощью однополярного выпрямителя
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.4>

При возгонке реагента в электрическом поле, создаваемом двухполярным выпрямителем, отклонение потока реагента происходило преимущественно на положительную пластину (рисунок 3). Это говорит о том, что большая часть частиц заряжается отрицательно, хотя в потоке присутствуют положительно заряженные и нейтральные частицы.



Рисунок 3 - Отклонение потока частиц реагента при возгонке в электрическом поле
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.5>

Изучение подложек с выпавшими кристаллами показало, что в присутствии электрического поля наблюдается значительно меньшее количество кристаллов, чем в присутствии электрического поля.

3.1. Результаты исследований льдообразующих свойств пиротехнического состава АД-1 при наличии электрического поля

Полученные результаты лабораторных экспериментов по определению удельного выхода кристаллов при наличии электрического поля представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Значение удельного выхода кристаллов при наличии электрического поля

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.6>

Напряженность, В/см	Температура в камере, °C	Масса реагента, г	Среднее количество кристаллов в кадре	Удельный выход, $\times 10^{11} \text{ г}^{-1}$
300	-8,0	0,21	106	0,63
297	-9,0	0,21	35	0,21
290	-8,0	0,21	169	1,00
293	-7,4	0,21	255	1,50
270	-11,2	0,18	19	0,13
270	-10,5	0,21	1009	6,00
233	-9,9	0,20	603	3,80
233	-9,9	0,21	173	1,03
233	-7,7	0,21	1112	6,60
233	-7,3	0,21	58	0,35
233	-6,5	0,21	178	1,60
233	-5,2	0,19	71	0,46
100	-7,8	0,21	493	2,90
90	-8,6	0,21	876	5,20
90	-7,7	0,21	544	3,20

На рисунке 4 представлена зависимость удельного выхода кристаллов от напряженности электрического поля. Можно заметить, что с увеличением напряженности электрического поля удельный выход кристаллов имеет тенденцию к уменьшению, причем достаточно быстрыми темпами.

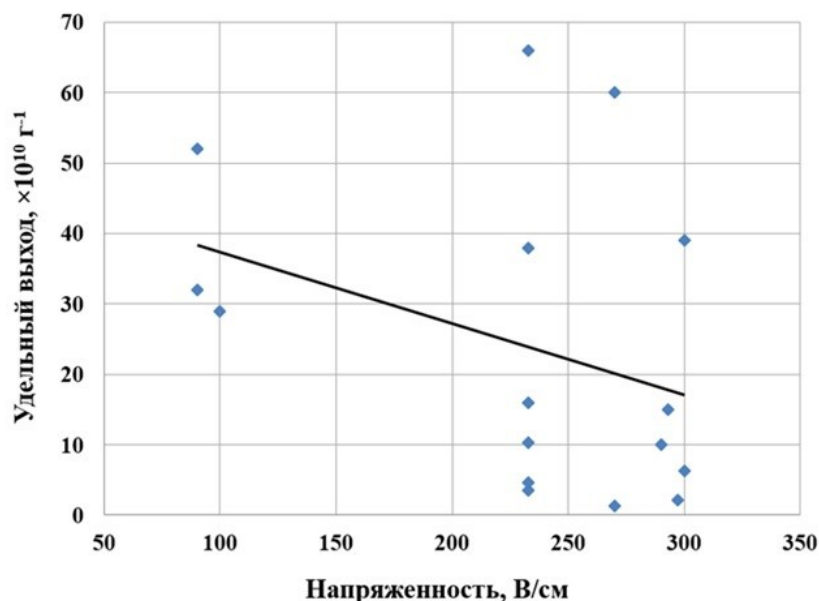


Рисунок 4 - Зависимость удельного выхода кристаллов от напряженности электрического поля

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.7>

Зависимость удельного выхода льдообразующих ядер от напряженности электрического поля описывается уравнением:

$$A = -0,1E + 47,5,$$

где A — удельный выход льдообразующих ядер, г^{-1} ;

E — напряженность электрического поля, В/см.

Как видно из уравнения, с увеличением напряженности электрического поля удельный выход кристаллов уменьшается. Известно, что электрический эффект, возникающий при кристаллизации, существенно зависит от химического состава облачной воды. В реальных условиях в облачной воде обычно растворены кислоты, щелочи, соли. В зависимости от их содержания эффект электризации кристаллизующихся капель может либо усиливаться, либо ослабляться.

Аналогичным образом были проведены эксперименты при отсутствии электрического поля.

Таблица 4 - Значение удельного выхода кристаллов при отсутствии электрического поля

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.84.8>

Температура в камере, °С	Масса реагента, г	Среднее количество кристаллов в кадре	Удельный выход, $\times 10^{11}$ г ⁻¹
-10,6	0,21	1115	6,6
-10,6	0,21	585	3,5
-10,5	0,21	1016	6,0
-9,9	0,21	617	3,7
-9,9	0,21	686	4,1
-9,7	0,21	436	2,6
-9,7	0,21	2087	12,0
-9,5	0,21	263	1,6
-9,4	0,21	909	5,4
-9,3	0,21	432	2,6
-8,6	0,21	286	1,7
-8,5	0,21	338	2,0
-8,2	0,21	1348	8,0
-7,9	0,21	1134	6,8

Анализ результатов, приведенных в таблицах 3–4 показывает, что удельный выход льдообразующих ядер при напряженности электрического поля 100 В/см при температурах минус 6–7°С уменьшается в 1,5 раза. При повышении напряженности электрического поля от 233 до 270 В/см при температуре минус 7–8 °С удельный выход льдообразующих ядер уменьшается в два раза. При повышении напряженности электрического поля от 270 до 300 В/см при температуре минус 8–9 °С удельный выход льдообразующих ядер уменьшается в три раза. Из вышесказанного следует, что при возгонке опытного материала под влиянием электрического поля удельный выход льдообразующих частиц уменьшается даже при понижении температуры.

Заключение

Разработана аппаратура и методика для исследования влияния электрического поля на льдообразующую эффективность пиротехнического состава АД-1. На основе анализа полученных результатов выявлено, что с увеличением напряженности электрического поля удельный выход кристаллов уменьшается, что, по-видимому, связано с влиянием электрического поля на конденсационные и коагуляционные процессы. Получена зависимость удельного выхода льдообразующих частиц опытного материала от напряженности электрического поля при разных температурах.

При АВ на градовые процессы реагент вносится в облачный слой между уровнями изотерм минус 6 ÷ 10 °С, наличие же электрического поля на этом уровне может привести к ослаблению льдообразующих свойств, вносимого реагента и, соответственно, к определенному снижению концентрации льдообразующих частиц. Таким образом, анализ и учет влияния различных параметров облака на эффективность кристаллизующих реагентов будет способствовать разработке более эффективных пиротехнических составов, также повлияет на правильную дозировку вносимого реагента и общий расход для достижения максимального эффекта в зависимости от поставленных целей проекта.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Эксперим. физика атмосферы : Учеб. для вузов по спец. «Метеорология» / Л.Г. Качурин. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. — С. 36–39.
2. Синькевич А.А. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния коронного разряда на электризацию частиц и фазовые переходы воды в облаках (обзор работ ГГО) / А.А. Синькевич, Ю.А. Довгалюк, В.Д. Степаненко // Вопросы физики облаков: сборник статей. — СПб. : Гидрометеиздат, 2004. — С. 109–123.

3. Хучунаев Б.М. Аппаратура, методика и предварительные результаты измерения удельного заряда на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов / Б.М. Хучунаев, С.О. Геккиева, А.Х. Будаев // Труды ГГО. — 2020. — № 599. — С. 128–139.
4. Абшаев А.М. Исследования влияния кристаллизующего засева на грозовую активность конвективных облаков / А.М. Абшаев, М.Т. Абшаев, А.А. Синькевич [и др.] // Метеорология и гидрология. — 2022. — № 8. — С. 46–58.
5. Довгалоук Ю.А. Результаты комплексных исследований характеристик мощного кучевого облака после воздействия / Ю.А. Довгалоук, В.П. Драчева, А.Д. Егоров [и др.] // Метеорология и гидрология. — 1997. — № 11. — С. 20–29.
6. Синькевич А.А. Радиолокационные и электрические характеристики грозových облаков при воздействии на них кристаллизующим реагентом (штат Карнатака, Индия) / А.А. Синькевич, Б. Боу, С.Д. Павар [и др.] // Метеорология и гидрология. — 2021. — № 8. — С. 112–122.
7. Хучунаев Б.М. Исследования влияния напряженности электрического поля и электрического заряда на частицах оксида цинка и пиротехнического состава АД-1 на их льдообразующие свойства / Б.М. Хучунаев, С.О. Геккиева, А.Х. Будаев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — № 8 (122). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.122.103.
8. Junge C. Das Wachstum der Kondensationskerne mit der relative Feuchtigkeit / C. Junge // Annalen der Meteorologie. — 1950. — Vol. 3. — S. 129–135.
9. Harmon C.W. Hygroscopic growth and deliquescence of NaCl nanoparticles mixed with surfactant SDS / C.W. Harmon, R.L. Grimm, T.M. McIntire [et al.] // J Phys Chem B. — 2010. — Vol. 114, № 7. — P. 2435–2449.
10. Liang H. Water vapor harvesting nanostructures through bioinspired gradient-driven mechanism / H. Liang, M.T. Abshaev, A.M. Abshaev [et al.] // Chemical Physics Letters. — 2019. — Vol. 728. — P. 167–173.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kachurin L.G. Fizicheskie osnovy vozddeistviya na atmosferye protsessy. Eksperim. fizika atmosfery [Physical fundamentals of atmospheric process modification. Experimental atmospheric physics] : Textbook for universities specializing in "Meteorology" / L.G. Kachurin. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1990. — P. 36–39. [in Russian]
2. Sinkevich A.A. Rezul'taty teoreticheskikh i eksperimental'nykh issledovaniy vliyaniya koronnogo razryada na elektrifikatsiyu chastits i fazovye perekhody vody v oblakakh (obzor rabot GGO) [Results of theoretical and experimental studies of the influence of corona discharge on particle electrification and water phase transitions in clouds (review of MGO works)] / A.A. Sinkevich, Yu.A. Dovgalyuk, V.D. Stepanenko // Voprosy fiziki oblakov [Problems of Cloud Physics] : Collection of Articles. — Saint Petersburg : Gidrometeoizdat, 2004. — P. 109–123. [in Russian]
3. Khuchunaev B.M. Apparatura, metodika i predvaritel'nye rezul'taty izmereniya udel'nogo zaryada na chastitsakh reagenta, obrazuyushchikhsya pri vozgongke pirotekhnicheskikh sostavov [Equipment, methodology and preliminary results of measuring the specific charge on reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions] / B.M. Khuchunaev, S.O. Gekkieva, A.Kh. Budaev // Trudy GGO [Proceedings of the Main Geophysical Observatory]. — 2020. — № 599. — P. 128–139. [in Russian]
4. Abshaev A.M. Issledovaniya vliyaniya kristallizuyushchego zaseva na grozovuyu aktivnost' konvektivnykh oblakov [Studies of the influence of crystalline seeding on thunderstorm activity of convective clouds] / A.M. Abshaev, M.T. Abshaev, A.A. Sinkevich [et al.] // Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]. — 2022. — № 8. — P. 46–58. [in Russian]
5. Dovgalyuk Yu.A. Rezul'taty kompleksnykh issledovaniy kharakteristik moshchnogo kucheвого oblaka posle vozddeistviya [Results of comprehensive studies of the characteristics of a powerful cumulus cloud after modification] / Yu.A. Dovgalyuk, V.P. Dracheva, A.D. Egorov [et al.] // Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]. — 1997. — № 11. — P. 20–29. [in Russian]
6. Sinkevich A.A. Radiolokatsionnye i elektricheskie kharakteristiki grozovykh oblakov pri vozddeistvii na nikh kristallizuyushchim reagenom (shtat Karnataka, Indiya) [Radar and electrical characteristics of thunderclouds when exposed to crystalline reagent (Karnataka state, India)] / A.A. Sinkevich, B. Bou, S.D. Pavar [et al.] // Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]. — 2021. — № 8. — P. 112–122. [in Russian]
7. Khuchunaev B.M. Issledovaniya vliyaniya napryazhennosti elektricheskogo polya i elektricheskogo zaryada na chastitsakh oksida tsinka i pirotekhnicheskogo sostava AD-1 na ikh l'doobrazuyushchie svoystva [Studies of the influence of electric field strength and electric charge on zinc oxide particles and AD-1 pyrotechnic composition on their ice-nucleating properties] / B.M. Khuchunaev, S.O. Gekkieva, A.Kh. Budaev // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — № 8(122). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.122.103. [in Russian]
8. Junge C. Das Wachstum der Kondensationskerne mit der relative Feuchtigkeit [The growth of condensation nuclei with relative humidity] / C. Junge // Annalen der Meteorologie [Annals of Meteorology]. — 1950. — Vol. 3. — P. 129–135. [in German]
9. Harmon C.W. Hygroscopic growth and deliquescence of NaCl nanoparticles mixed with surfactant SDS / C.W. Harmon, R.L. Grimm, T.M. McIntire [et al.] // J Phys Chem B. — 2010. — Vol. 114, № 7. — P. 2435–2449.
10. Liang H. Water vapor harvesting nanostructures through bioinspired gradient-driven mechanism / H. Liang, M.T. Abshaev, A.M. Abshaev [et al.] // Chemical Physics Letters. — 2019. — Vol. 728. — P. 167–173.