

25.00.30
УДК 551.557.59

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Хучунаев Б.М.,

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия,
e-mail: buzgigit@mail.ru

Геккиева С.О.,

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия,
e-mail: sgekkiyeva@list.ru

Будаев А.Х.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия,
e-mail: budayalim@yandex.ru

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЬДООБРАЗУЮЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОГРАДОВЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.3.7

Введение.

В настоящей статье представлен метод определения льдообразующей эффективности противорадовых изделий (ПГИ) с выходом активных частиц более 107 с 1 г реагента на лабораторных установках Высокогорного геофизического института. Физической основой применения кристаллизующих реагентов является способность их аэрозолью создавать в переохлажденной облачной среде ледяные кристаллы, которые быстро растут за счет перегонки водяного пара с окружающих капель, что способствует разрешению фазовой неустойчивости переохлажденной облачной среды [1]. Одним из наиболее широко используемых реагентов при воздействии на переохлажденные облака с целью предотвращения градобитий и вызывания осадков, является йодистое серебро AgI. Вместе с тем, эффективность данного реагента при взаимодействии с переохлажденной облачной средой при температуре минус 6 °С и выше падает. В связи с этим исследования в области повышения льдообразующей эффективности противорадовых изделий являются достаточно актуальными и по настоящее время.

Материалы и методы исследования.

Мерой эффективности льдообразующего реагента является количество активных частиц, полученных из единицы массы реагента (далее – выход), переведенного в аэрозоль тем или иным способом, в частности, сжиганием пиротехнического состава с льдообразующим веществом. Принцип измерения эффективности льдообразующего реагента состоит в определении числа ледяных кристаллов, образующихся при введении известного количества исследуемого реагента в виде аэрозоля в переохлажденный водный туман. В качестве рабочего материала для лабораторных исследований были рассмотрены пиротехнические составы, которые используются в противорадовых изделиях (ПГИ) типа «Алазань-6» и «Алазань-9» [2, 3, 4].

Результаты исследования и их обсуждение.

В статье представлен метод определения льдообразующей эффективности противорадовых изделий на лабораторных установках ВГИ. Использование данного метода позволит повысить льдообразующую эффективность противорадовых изделий с использованием различных добавок к пиротехническому составу.

Выводы.

Метод, представленный в настоящей статье, может быть использован научно-исследовательскими учреждениями, военными службами активных воздействий и другими организациями Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), осуществляющими разработку, внедрение и испытание новых льдообразующих реагентов и пиротехнических составов.

Ключевые слова:

активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы.

- Khuchunaev B.,** Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, Nalchik,
e-mail: buzgigit@mail.ru
- Budaev A.,** Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, Nalchik,
e-mail: budayalim@yandex.ru
- Gekkieva S.** Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, Nalchik,
e-mail: sgekkieva@list.ru

Methods for Determining the Ice-forming Efficiency of Anti-hail Products on Laboratory Installations

- Introduction.** This article presents a method for determining the ice-forming efficiency of anti-hail products with an output of more than 107 active particles per 1 g of reagent at laboratory facilities of the High Mountain Geophysical Institute. The physical basis for the use of crystallizing reagents is the ability of their aerosols to create ice crystals in a supercooled cloud environment, which grow rapidly due to the distillation of water vapor from surrounding droplets, which helps to resolve the phase instability of a supercooled cloud environment [1]. One of the most widely used reagents when exposed to supercooled clouds in order to prevent hail and precipitation is silver iodide AgI. At the same time, the effectiveness of this reagent when interacting with a supercooled cloudy environment at a temperature of minus 6 °C and above decreases. In this regard, studies in the field of increasing the ice-forming efficiency of anti-hail products are quite relevant to the present time.
- Materials and methods of the research.** A measure of the effectiveness of the ice-forming reagent is the number of active particles obtained from a unit mass of the reagent (hereinafter referred to as the yield), converted into an aerosol in one way or another, in particular, by burning a pyrotechnic composition with an ice-forming substance. The principle of measuring the effectiveness of an ice-forming reagent consists in determining the number of ice crystals formed when a known amount of the reagent under study is introduced in the form of an aerosol into a supercooled water mist. Pyrotechnic compositions used in anti-hail products such as «Alazan-6» and «Alazan-9» were considered as a working material for laboratory research [2, 3, 4].
- The results of the study and their discussion.** The article presents a method for determining the ice-forming efficiency of anti-hail products at laboratory facilities of the High Mountain Geophysical Institute. The use of this method will increase the ice-forming efficiency of anti-hail products using various additives to the pyrotechnic composition.
- Conclusions.** The method presented in this article can be used by research institutions, paramilitary services of active influence and other organizations of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, which develop, introduce and test new ice-forming reagents and pyrotechnic compositions.
- Keywords:** active influences, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles.

Введение

Принцип оценки эффективности ПГИ состоит в определении числа ледяных кристаллов, образующихся при введении известного количества пиротехнического состава в виде аэрозоля в переохлажденный водный туман. Туман создается в охлаждаемой облачной камере пуском струи горячего водяного пара или механическим диспергированием воды. Исследуемый пиротехнический состав предварительно переводят в аэрозоль в отдельном резервуаре – аэрозольной камере. Количество образовавшихся ледяных кристаллов оценивается по числу кристаллов, выпавших на единицу площади пола облачной камеры. Улавливание кристаллов производится либо на пленку репликаобразующего вещества, которая после затвердевания сохраняет отпечатки осевших ледяных кристаллов, либо в микротермостат, сохраняющий ледяные кристаллы в течение времени, достаточного для их подсчета с помощью оптического микроскопа [5, 6, 7].

Материалы и методы исследования

Необходимым лабораторным оборудованием в методе являются охлаждаемая облачная камера (КПТ), камера для получения аэрозоля (аэрозольная камера), ультразвуковой парогенератор, устройство (шприц) для дозированного отбора проб аэрозоля и автоматизированная система для подсчета ледяных кристаллов, которая состоит из персонального компьютера (ПК) и оптического микроскопа Motis с видеокамерой. Средствами измерений являются термометр для измерения температуры в рабочем объеме облачной камеры, измеритель влажности, секундомер, весы для взвешивания образцов реагента (пиросостава). Состав типовой установки (рис. 1):

- облачная камера (на основе холодильного агрегата ФАК–1,5МЗ) объемом 0,080 м³; облачная камера TSW–300;
- аэрозольная камера объемом 2,0 м³ с автономной системой очистки;
- ультразвуковой парогенератор Electrolux EHU–2510D мощностью 140 Вт;
- электронные весы «Adventure» с точностью взвешивания до 10⁻⁴ г;

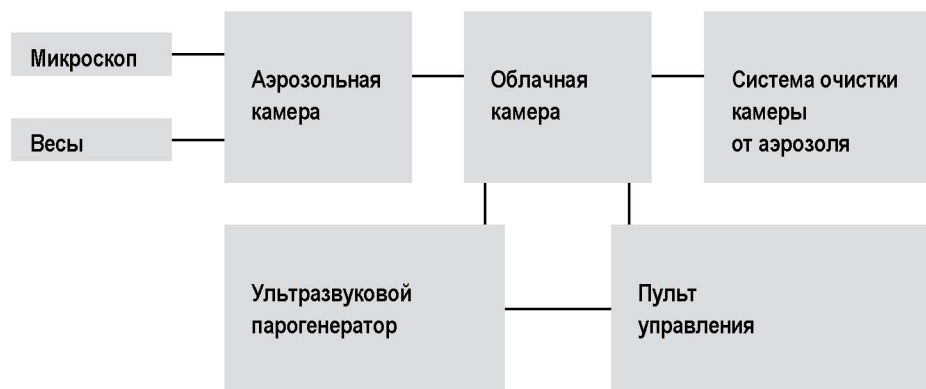


Рис. 1. Состав типовой установки.

Fig. 1. Typical installation composition.

- микроскоп Motic;
- пульт управления устройствами внутри облачной камеры и парогенератором.

Аэрозольная камера представляет собой прямоугольный короб объемом 1 м³. Аэрозольная камера изготовлена из винипласта, передняя стенка выполнена из оргстекла. В этой стенке имеется дверца для введения в камеру устройства для получения аэрозолей и небольшой люк, через который с помощью шприца отбираются пробы аэрозоля для исследования в облачной камере. Внутри аэрозольной камеры, на одной из боковых стенок, установлен вентилятор, используемый для выравнивания концентрации получаемого аэрозоля. Для очистки камеры от аэрозоля в ее потолке сделано отверстие, закрываемое крышкой на время опыта и соединяющее при необходимости камеру с вытяжкой вентиляционной трубой. Для ускорения процесса очистки и более полного удаления частиц аэрозольная камера снабжена обводной трубой, на входе которой установлен аэрозольный фильтр. Ускоренная очистка производится при принудительном протягивании камерного воздуха через аэрозольный фильтр с помощью воздуходувки.

Ультразвуковой парогенератор создает водяной пар из дистиллированной воды ультразвуковой мембраной. Для отбора проб аэрозолей применяется шприц объемом от 20 до 250 см³ с ценой деле-

ния от 1 до 10 см³ соответственно. Для подсчета кристаллов используется микроскоп типа Motis с увеличением от 100 раз.

При проведении испытаний контролируются следующие параметры с использованием инструментальных средств измерений: измерение температуры в облачной и аэрозольной камерах должно производиться измерителем температуры с диапазоном измеряемых температур от минус 25 до 25 °С и погрешностью показаний не более $\pm 0,3$ °С; измерение времени должно производиться секундомером с ценой деления 1 с; измерение массы переводимого в аэрозоль вещества производится с помощью микроаналитических весов с точностью 0,01 мг.

Результаты исследования и их обсуждение

При повышении температуры в рабочем объеме КПП до значения на 1,5–2 °С ниже необходимой температуры опыта производят возгонку навески пиросоостава в аэрозольной камере. Образовавшийся аэрозоль перемешивается вентилятором в течение 30–45 с. Вентилятор отключают и аэрозоль оставляют в аэрозольной камере на 30–60 с. Во время выдержки аэрозоля в аэрозольной камере репликообразующим раствором смазывают предназначенное для экспонирования предметное стекло в заборнике ледяных кристаллов. Для этого стеклянной палочкой на стекло вручную наносят каплю из находящейся в КПП бюксы с раствором. Каплю раскатывают в тонкую пленку с помощью стеклянного валика. Палочка и валик находятся постоянно в рабочем объеме КПП и имеют ее температуру.

Включают парогенератор и пуском струи пара в КПП создают туман. На время пуска пара стекло в заборнике закрывают заслонкой, а в КПП 1–2 раза включают вентилятор на 1–2 с для получения более однородного тумана. После создания в КПП тумана с помощью шприца производят отбор пробы аэрозоля из аэрозольной камеры. Пробу вводят в КПП. Сразу после введения пробы в КПП включают вентилятор на 1–2 с для равномерного распределения аэрозольных частиц в рабочем объеме. Заслонку заборника открывают и образовавшиеся кристаллы улавливаются на стеклянную пластинку с пленкой репликообразующего раствора в течение до полного рассеяния тумана. Одновременно интенсивность образования ле-

дяных кристаллов приближенно оценивают визуально в пучке света. Сразу после открытия заслонки заборника фиксируют показание термометра в облачной камере с точностью до 0,5 дел. ($\pm 0,1$ °C). Во время осаждения кристаллов производят очистку аэрозольной камеры. Для этого камеру соединяют с вытяжной вентиляционной трубой. Одновременно открывают люк в передней дверце аэрозольной камеры для поступления воздуха в камеру из лабораторного помещения. Очистку камеры производят не менее 10 мин. При необходимости более полной очистки аэрозольной камеры производят дополнительную очистку протягиванием камерного воздуха через фильтр. Для этого камеру отсоединяют от вытяжной трубы и полностью закрывают. На 5 мин включают воздуходувку, осуществляющую принудительную перекачку камерного воздуха через фильтр по обводной трубе. В КПТ по окончании экспонирования стекло поворотом диска убирают под крышку кожуха заборника, отверстие в кожухе закрывают заслонкой и в КПТ вводят новую порцию пара для вымывания остаточных частиц, активирующихся в течение более длительного времени. Для полного очищения КПТ обычно достаточно 1–2 пусков пара, производимых при температуре на 1–5 °C ниже, чем температура последующего опыта. По окончании очистки установка готова для нового измерения. Регистрация образующихся в КПТ ледяных кристаллов производится с помощью метода получения твердых отпечатков-реплик на пленке полиметилметакрилата. Для приготовления репликообразующего раствора 10–15 см³ мономера метилметакрилата кипятится в пробирке с добавкой 2–4 мг перекиси бензоила в течение 10–30 мин. Оптимальная длительность кипячения зависит от условий предварительного хранения мономера и не может быть указана точно. Кипячение заканчивают, когда образующиеся в жидкости пузырьки не в состоянии выплыть на поверхность и прилипают ко дну пробирки. Подготовленный таким образом полиметилметакрилат хранится в бюксе с притертой пробкой в облачной камере. Оптимальная по густоте и толщине пленка полиметилметакрилата должна давать четкие отпечатки кристаллов с размерами более 5 мкм, а также крупных облачных капель (в виде точек).

Экспонированные предметные стекла оставляют в заборнике на 2–3 ч при поддержании в КПТ температуры ниже 0 °C (во избе-

жание таяния кристаллов) до полного затвердевания репликаобразующего раствора. После окончания процесса осаждения кристаллов предметные стекла извлекаются и полученные кристаллы фотографируются в цифровом микроскопе Motic с последующим их программным или ручным подсчетом.

На выбранных, по визуальной оценке, удовлетворительных участках стекла определяется число ледяных кристаллов на нескольких полях зрения. Число обсматриваемых полей зрения устанавливается по среднему числу ледяных кристаллов в поле зрения так, чтобы $\bar{n} \cdot n_1 \geq 100$. При количестве кристаллов $\bar{n} \leq 100$ просматривается вся поверхность предметного стекла.

Обработка результатов измерений. Оценка показателей точности измерений выхода активных частиц [8, 9, 10].

*Расчетная формула для вычисления
выхода активных частиц*

Выход активных частиц N на единицу массы переведенного в аэрозоль вещества (Γ^{-1}) определяется по формуле

$$N = \frac{\bar{n}VS}{svm}, \quad (1)$$

где \bar{n} – среднее арифметическое значение числа ледяных кристаллов n_i в поле зрения микроскопа

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^{n_1} n_i / n_1, \quad (2)$$

где V – объем аэрозольной камеры, см³;
 S – площадь пола облачной камеры, см²;
 s – площадь поля зрения микроскопа, см²;
 v – объем пробы аэрозоля, см³;
 m – масса переведенного в аэрозоль вещества, г.
 \bar{n}_1 – число просмотренных полей зрения.

В случае $\bar{n} \leq 1$ и просмотре всей поверхности стекла s в формуле (1) заменяется площадью, ограниченной предельным перемещением предметного столика.

Результаты измерения N при различных температурах тумана могут оформляться в виде таблицы $N - T$ или графической зависимости $N(T)$, построенной в полулогарифмической шкале $\log N(T)$.

*Оценка погрешности результата
измерения выхода активных частиц*

Суммарная относительная погрешность δ_N отдельного измерения выхода активных частиц N складывается из двух случайных составляющих: погрешности, связанной с погрешностью в измерении температуры опыта δ_T , и погрешности определения величины N , исходя из формулы (1) по правилам вычисления погрешности косвенных измерений δ

$$\delta_N = \pm \sqrt{\delta_T^2 + \delta^2}. \quad (3)$$

Для большинства исследуемых типов зависимостей $N(T)$ с наклоном кривых $\Delta N / (\Delta T \cdot N)$ от 0,5 до 1 $(^\circ\text{C})^{-1}$, относительная погрешность δ_T составляет от 10 % до 20 %.

Определяемыми величинами в формуле (1) являются – среднее количество ледяных кристаллов в поле зрения микроскопа \bar{n} , объем вводимого в КПТ пробы аэрозоля v и масса переводимого в аэрозоль вещества m .

Поэтому

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_{\bar{n}}^2 + \delta_v^2 + \delta_m^2}, \quad (4)$$

где $\delta_{\bar{n}}$, δ_v и δ_m – относительные погрешности определения переменных величин \bar{n} , v и m .

Величина $\delta_{\bar{n}}$ является средней квадратичной погрешностью в измерении среднего числа ледяных кристаллов в поле зрения микроскопа и составляет ± 15 %.

Относительная погрешность определения массы переводимой в аэрозоль навески вещества δ_m в интервале значений m от 10 до 300 мг, измеряемых с помощью микроаналитических весов, составляет от ± 10 % до $\pm 0,1$ %. Относительная погрешность определения объема пробы аэрозоля при использовании шприца с ценой деления 10 мл для обычно применяемых объемов от 50 до 200 см^3 составляет от ± 10 % до ± 3 %.

С учетом этих величин максимальное значение погрешности составляет

$$\delta_{\min} = \pm\sqrt{0,15^2 + 0,1^2 + 0,1^2} = \pm 0,206 = \pm 21 \%$$

Минимальное значение

$$\delta_{\min} = \pm\sqrt{0,15^2 + 0,03^2 + 0,003^2} = \pm 0,150 = \pm 15 \%$$

Суммарная погрешность отдельного измерения выхода активных частиц δ_N имеет максимальное $\pm 29 \%$ и минимальное значение $\pm 18 \%$.

Регистрация результатов измерений и расчетов выхода активных частиц

В рабочий журнал записывают: наименование исследуемого состава; название (тип) сжигающего устройства и характеристики используемого режима его работы; дату; номер опыта; температуру тумана; массу переведенной в аэрозоль навески состава; номер предметного стекла; объем пробы аэрозоля; визуальную оценку примерного числа ледяных кристаллов в пучке света.

После обработки результатов в журнал записывают среднее число ледяных кристаллов в поле зрения микроскопа, общее расчетное число кристаллов в рабочем объеме КПП, массу введенного в КПП пиросостава и выход активных частиц в расчете на единицу массы исследованного пиросостава.

Предел обнаружения и диапазон изменения определяемой величины

Минимальное и максимальное определяемые значения выхода активных частиц определяются методом регистрации частиц, объемом используемой аэрозольной камеры и допустимым по средствам измерения количеством диспергируемого в аэрозоль вещества. В данном методе они составляют 10^7 и 10^{19} г^{-1} .

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

Погрешность метода

Основная погрешность складывается из систематической и случайной составляющих. Систематическая составляющая основной погрешности обуславливается потерями аэрозольных частиц (их коагуляцией и осаждением) во время подготовительных операций по введению аэрозоля в переохлажденный туман и наличием неустраняемых температурных градиентов в рабочем объеме КПТ, приводящих к активации части ядер при температурах, отличных от температуры опыта, регистрируемой в центре КПТ. При обычной продолжительности подготовительных операций 1–3 мин суммарные потери аэрозольных частиц с начальной концентрацией менее 10^7 см^{-3} и размерами менее $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, согласно экспериментальной оценке, не превышают 5%. Систематическая погрешность, связанная с температурными градиентами в КПТ, зависит от вида температурной зависимости выхода $N(T)$ и при градиентах менее $0,03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$ не превышает 5% для участков $N(T)$, где выход мало меняется с температурой ($\Delta N/\Delta T \leq 0,1N \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), увеличиваясь до 25% вблизи температурного порога активности пиросоостава, где $\Delta N/\Delta T \geq N \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Случайная составляющая основной погрешности складывается из погрешности в определении исходной массы переводимого в аэрозоль пиросоостава; погрешности в определении объема пробы исследуемого аэрозоля; погрешности определения числа активированных частиц (ледяных кристаллов) и погрешности измерения температуры переохлажденного тумана. Две первые погрешности определяются погрешностями весов и шприца – отборника проб, и каждая из них не превышает $\pm 10 \%$.

Погрешность в определении числа кристаллов состоит из погрешности подсчета кристаллов, не превышающей $\pm 5 \%$, и погрешности, обусловленной ограниченностью выборки – флуктуациями числа n кристаллов, попадающих в поле зрения микроскопа. Эта погрешность может быть снижена путем увеличения числа обсчитываемых полей зрения с тем, чтобы погрешность, определяемая по закону Пуассона как $1/\sqrt{\bar{n}} \cdot n_1$ (\bar{n} – среднее число кристаллов в поле зрения, n_1 – число полей), оставалась на достаточно низком уровне (не более $\pm 10 \%$). Случайная составляющая погрешности измерения, связанная с погрешностью в определении температуры переох-

лажденного тумана, зависит от характера температурной зависимости выхода. Для наиболее типичных участков температурного спектра $\Delta N/\Delta T$ от $0,05 \cdot N^\circ\text{C}^{-1}$ до $0,1 \cdot N^\circ\text{C}^{-1}$ она составляет $\pm(10-20)\%$. При более резком изменении N с температурой $\Delta N/\Delta T \geq N^\circ\text{C}^{-1}$ погрешность возрастает до 80 % и более.

Производительность метода

Длительность одного опыта составляет от 40 до 50 мин, что с учетом подготовительных операций позволяет проводить 6–8 измерений в течение 8-часового рабочего дня.

Выводы

На основе исходного льдообразующего топлива АД-1 разработан метод определения льдообразующей эффективности противогололедных изделий на лабораторных установках. Данный метод рекомендуется использовать для получения новых эффективных пиротехнических составов для оснащения метеорологических ракет, предназначенных для активных воздействий на грозовые облака с целью искусственного увеличения жидких осадков и борьбы с градом [11, 12, 13].

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. 315 с.
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. Wegener A. Thermodynamic der Atmosphäre. Leipzig, 1911. P. 311.
4. Vonnegut B. Experiments with silver-iodide smokes in the natural atmosphere. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1950, Vol. 31. 65 p.
5. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 271 с.
6. Закинян Р.Г. Кинетика роста льда на поверхностях предметов различных форм, помещенных в поток переохлажден-

ного аэрозоля // Материалы V научно-технической конференции СК ГТУ, 2001. С. 20.

7. Khuchunaev B.M., Baysiev Kh.-M. Kh, Gekkieva S.O., Budaev A. Kh. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering PAPER • OPEN ACCESS Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of silver iodide AgI particles and zinc oxide. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1083 012097.
8. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 76 с.
9. Вопросы физики облаков. Сборник избранных статей ГГО. Астерион, СПб., 2008. С. 98–106.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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. № 4 (158), 2010. 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. Wegener A. Thermodynamic der Atmosphere. Leipzig, 1911. 311 p.
4. Vonnegut B. Experiments with silver-iodide smokes in the natural atmosphere. Bull. Amer. Meteor. Soc. Vol. 31. 1950. 65 p.
5. Nikandrov V.Ya. Artificial influences on clouds and fogs. L.: Gidrometeoizdat, 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 SK GTU, 2001. 20 p.
7. Khuchunaev B.M., Baysiev Kh.-M. Kh, Gekkieva S.O., Budaev A. Kh. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering PAPER • OPEN ACCESS Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of silver iodide AgI particles and zinc oxide. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.1083 012097.
8. Ivlev L.S., Dovgalyuk Yu.A. Physics of atmospheric aerosol systems. Saint Petersburg: NIIH SPbGU, 1999. 76 p.
9. Questions of the physics of clouds. Collection of selected articles of the MGO. Asterion, St. Petersburg, 2008. P. 98–106.
10. 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 active influence on clouds // Proceedings of the jubilee conference, dedicated to the 40th anniversary of the beginning of production works on protection from hail. Nalchik: Printing House, 2011. P. 259–260.
11. Huchunaev 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.
12. 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.
13. 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 // News of higher educational institutions. North Caucasian region. № 4 (158), 2010. P. 64–67.

Поступило в редакцию 27.08.2021,
принято к публикации 06.09.2021.

Сведения об авторах

- Хучунаев** Бузжигит Муссаевич, докт. физ.-мат наук, зав. лабор. МФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, г Нальчик, пр. Ленина, 2.
E-mail: buzgigit@mail.ru
- Геккиева** Сафият Омаровна, канд. ф.-м. н., СНС ЛМФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, г Нальчик, пр. Ленина, 2.
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** Buzzhigit, 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. 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.
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