УДК 551.509.616

doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-31-40

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ РЕАГЕНТОВ

**Н.С.** Ким<sup>1</sup>, В.П. Корнеев<sup>1</sup>, А.М. Петрунин<sup>1</sup>, **А.В.** Частухин<sup>1</sup>, Е.Ф. Воронин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АНО «Агентство атмосферных технологий», Москва, Россия, attech@mail.ru

Приводятся результаты исследования эффективности наноразмерных льдообразующих реагентов, которые предполагается использовать в активных воздействиях на облака для регулирования осадков и борьбы с градом. Результаты исследований льдообразующих реагентов, проведенных на лабораторных установках в ФГБУ «НПО «Тайфун», ФГБУ «ВГИ», АО «ЧПО им. В.И. Чапаева» и АНО «Агентство атмосферных технологий», показали, что эффективность этих реагентов существенно отличается от полученных ранее в ФГБУ «ЦАО». Высказано предположение, что низкая эффективность наноразмерных льдообразующих реагентов связана с высокой агрегированностью исходных частиц нанокремнезема.

*Ключевые слова:* йодид серебра, нуклеация льда, льдообразующая эффективность, наноразмерные реагенты, кремнезем, агрегация, агломераты.

# RESEARCH OF EFFICIENCY OF NANOSIZED POWDERED ICE-FORMING REAGENTS

N.S. Kim<sup>1</sup>, V.P. Korneev<sup>1</sup>, A.M. Petrunin<sup>1</sup>, A.V. Chastuhin<sup>1</sup>, E.F. Voronin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ANO «Agency of Atmospheric Technologies»

The article discusses nanosized powdery ice-forming reagents, which are supposed to be used in the works on active action on clouds in order to regulate precipitation and hail suppression, as well as to dissipate supercooled fog. These ice-forming reagents have been obtained by the levilite method, in which a layer of silver iodide is deposited on the surface of nanosilica particles. Description of the methodology for studying the effectiveness of nanosized powdery ice-forming reagents, as well as the results of laboratory studies of their effectiveness obtained in different organizations is given. The results of studies of ice-forming reagents carried out at laboratories of RPA "Typhoon", High-Mountain Geophysical Institute, JSC "Cheboksary production association n.a. V.I. Chapaev" and ANO "Agency of atmospheric technologies" have shown that the efficiency of these reagents differs significantly from those obtained earlier in the Central Aerological Observatory. It has been suggested that the low efficiency of nanosized ice-forming reagents is due to the high aggregation of the original nanosilicum particles, resulting from the high surface activity of these particles. Possible ways to reduce the degree of aggregation of powders by modifying the surface of the original nanoparticles aimed at decreasing the high activity of the nanosilica particles surface are discussed.

*Keywords:* silver iodide, ice nucleation, ice-forming efficiency, nanosized reagents, silica, aggregation, agglomerates.

**For citation:** *Kim N.S., Korneev V.P., Petrunin A.M., Chastuhin A.V., Voronin E.F.* Research of Efficiency of Nanosized Powdered Ice-Forming Reagents. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 58: 31—40. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-31-40

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Institute of surface chemistry A.A. Chuiko NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

# Введение. Состояние вопроса

Основным реагентом, применяемым при активных воздействиях на переохлажденные облака и туманы, до настоящего времени является наиболее эффективный, но дорогостоящий йодид серебра [1], который вводится в облако в виде высокодисперсного аэрозоля. Развитие теории гетерогенной нуклеации льда Флетчера [2] и результаты многочисленных экспериментальных исследований показали, что большую роль в эффективности нуклеации льда играют не объемные, а поверхностные характеристики аэрозольной частицы [3]; при этом особую роль играют так называемые активные центры льдообразования, природа которых до настоящего времени не выявлена. Как показали выводы стохастической теории гетерогенной нуклеации льда [4], процесс льдообразования происходит на активном центре, имеющем наибольший размер из всех существующих на поверхности.

В общем случае число активных льдообразующих частиц в аэрозоле можно записать в виде следующей формулы [4]:

$$N = N_1 \int_0^\infty \theta \left( r - r^* \right) \left\{ 1 - \exp \left[ -4\pi r^2 e^{k_0 \left( \Delta T - \Delta T_{50} \right)} \cdot \frac{\left( 1 - e^{\beta \tau} \right) \cdot \ln 2}{\left( 1 - e^{-\beta \tau_{5}} \right) \cdot S_{5}} \right] \right\} f(r) dr. \tag{1}$$

С помощью этого уравнения можно учесть следующие основные параметры, определяющие активность льдообразующих аэрозолей:

- влажность среды, пороговое влияние которой учитывается посредством функции  $\theta(r-r^*)$ , где  $\theta$  влажность среды, r радиус частицы,  $r^*$  критический размер, при котором на частице начинается образование льда;
- температура среды (переохлаждение), определяющая вероятность нуклеации;
- дисперсные характеристики аэрозоля, описываемые с помощью f(r) и учитываемые как в  $\theta(r-r^*)$ , так и в показателе экспоненты, определяющей вероятность нуклеации в адсорбированной на поверхности частицы пленке воды;
- параметры, описывающие адсорбционные и кристаллизационные ( $\Delta T_{50}$ ,  $S_{9}$  и  $\tau_{9}$ ) характеристики поверхности аэрозольных частиц, где  $\Delta T_{50}$  пороговая температура, при которой 50% капель, содержащих частицы суммарной площадью  $S_{9}$ , кристаллизуется за фиксированное время  $\tau_{9}$ .

Очевидно, что при увеличении эффективной поверхности частицы, т. е. при увеличении нуклеационной активности центров льдообразования, роль этих параметров должна возрастать относительно размера частицы.

Таким образом, для проведения эффективного воздействия на переохлажденные облака можно использовать аэрозольные частицы сложной структуры, на поверхности которых расположены участки или тонкий слой йодида серебра, а внутренний объем состоит из дешевого инертного вещества. При этом размер частиц, согласно формуле (1), должен обеспечить адсорбционное формирование пленки воды на начальном этапе гетерогенной нуклеации льда. Для обычных температурных условий в слое облака, на которое проводится воздействие, радиус такой частицы должен составлять 0,01—0,04 мкм.

На основе этих положений в конце 80-х годов прошлого века в Институте химии поверхности им. А.А.Чуйко НАН Украины (тогда еще отдел химии поверхности Института физической химии им. Л.В. Писаржевского АН УССР) была разработана технология [5] получения наноразмерных порошкообразных льдообразующих реагентов, на поверхности частиц которого был нанесен слой Agl. В качестве инертных носителей были использованы частицы диоксида кремния (нанокремнезем) диаметром около 0,01 мкм. На этом этапе содержание йодида серебра составляло около 2 %. Результаты испытаний по методике НПО «Тайфун» [6] при пневматическом распылении этого порошка в воздушном потоке аэродинамической трубы не показали практически значимого выхода льдообразующих частиц и были ниже порога чувствительности для этой методики (менее 109 частиц на 1 г порошка).

Дальнейшие исследования в Институте химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины позволили авторам разработать ряд наноразмерных порошкообразных льдообразующих реагентов с повышенным содержанием AgI (до 13 %), которые при испытаниях в ФГБУ «ЦАО» показали очень высокую льдообразующую эффективность [7]. Результаты этих испытаний для двух наиболее эффективных реагентов (образцы М-333 и LN-212) и штатного пиротехнического состава АД-1, содержащего 8 % AgI (Россия), приведены в табл. 1.

Таблица 1Льдообразующая эффективность pearentros LN-212 и M-333Ice-forming efficiency of reagents LN-212 and M-333

Tarranamma °C	Выход частиц, г-1				
Температура, °С	M-333	LN-212	АД-1		
-10	4,60·10 <sup>13</sup>	5,00·10 <sup>14</sup>	1,23·10 <sup>13</sup>		
-8	$1,53 \cdot 10^{13}$	3,50·10 <sup>14</sup>	$7,84 \cdot 10^{12}$		
-6	$8,00 \cdot 10^{12}$	4,40.1013	$2,84\cdot10^{12}$		
-3	$9,66\cdot10^{11}$	1012	$6,00 \cdot 10^{10}$		

Сравнение данных табл. 1 показывает, что, например, эффективность порошка LN-212, содержащего 12 % AgI, во всем температурном диапазоне на полтора порядка величины превышает эффективность штатного пиротехнического состава АД-1.

При такой высокой эффективности порошкообразные реагенты, кроме того, обладают важными практическими преимуществами перед пиротехническими составами: во-первых, они пожаро- и взрывобезопасны, во-вторых, хранение и транспортировка таких реагентов не требуют специальных мер предосторожности и, в-третьих, при проведении практических работ для получения положительного эффекта воздействия потребуется значительно меньшее количество реагента.

На основе данных, заимствованных из [7] с учетом более высокой пороговой температуры льдообразования (согласно данным табл. 1), авторами были проведены численные исследования по оценке эффективности порошкообразного льдообразующего реагента LN-212 при воздействии на облака в сравнении

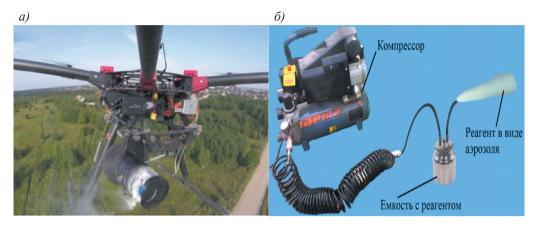


Рис. 1. Устройства для распыления наноразмерного льдообразующего реагента. a) с дистанционно пилотируемого летательного аппарата (гексакоптера),  $\delta$ ) с борта самолета.

Fig. 1. Devices for spraying nanoscale ice-forming reagent.

a) from a remotely piloted aircraft (hexacopter),  $\delta$ ) from aboard.

с самолетными пиротехническими генераторами [8]. Результаты расчета показали, что эффект от воздействия наноразмерным льдообразующим реагентом LN-212, сравнимый с эффектом от воздействия самолетным пиротехническим генератором, достигается при значительно меньшем массовом расходе реагента.

Такой малый по сравнению с традиционными пиротехническим составами расход реагента, необходимый для получения положительного эффекта воздействия, позволил рассмотреть возможность применения как беспилотных, так и пилотируемых летательных аппаратов, оборудованных устройством для диспергирования наноразмерных порошкообразных льдообразующих реагентов.

На рис. 1 представлены разработанные АНО «Агентство атмосферных технологий» (АНО «Агентство АТТЕХ») опытные образцы устройств, с помощью которых предполагалось производить диспергирование льдообразующих реагентов при проведении натурных испытаний.

Основной задачей настоящих исследований является получение уточненных данных об эффективности льдообразующего реагента типа LN-212 в разных организациях России.

# Методические особенности исследования эффективности наноразмерных порошкообразных реагентов

Дополнительные лабораторные испытания были проведены в 2017—2018 гг. Испытания проводились с опытно-промышленной партией наноразмерного льдообразующего реагента типа LN-212, изготовленного по той же технологии, что и опытные образцы реагента LN-212 партии 2014 г. Согласно паспортным данным, реагент LN-212 содержал:

- 1) диоксид кремния (SiO<sub>2</sub>) 58 %;
- 2) йодид серебра (AgI) 12 %;
- 3) нитрат калия (KNO<sub>2</sub>) 12 %;
- 4) вода (Н<sub>2</sub>О) 18 %.

Определение выхода активных частиц проводилось по стандартной методике ФГБУ «ЦАО». При этом получение аэрозоля производилось путем распыления с помощью стеклянного шприца 10—20 мг навески порошка, взятого из небольшого стеклянного стаканчика (бюкса), с последующим внесением (вдуванием) пробы в отдельную аэрозольную камеру объемом  $\sim 800$  л [7]. После перемешивания и выравнивания концентрации проба полученного аэрозоля оптимального объема (от 20 до 150 см<sup>3</sup> при разной температуре тумана) вводилась в облачную камеру (объемом  $\sim 300$  л) с предварительно созданным переохлажденным туманом.

В табл. 2 приведены результаты испытаний данной партии реагента LN-212, предоставленной АНО «Агентство АТТЕХ», проведенных в ФГБУ «ЦАО» в 2017 г. (в соответствии с актом испытаний ФГБУ «ЦАО»).

 $\it Tаблица~2$  Льдообразующая эффективность реагента LN-212 Ice-forming efficiency of reagent LN-212

Температура, °С	Выход, г-1	Примечание	
-12,0	5,22·10 <sup>13</sup>	_	
-10,0	$2,01\cdot10^{13}$	_	
-9,0	1,32·10 <sup>13</sup>	_	
-8,0	1,27·1012	_	
-6,0	6,04·1011	_	
-10,0	5,75·10 <sup>13</sup>	Перетертый	
-8,0	8,10.1012	Перетертый	
-6,0	2,60·1012	Перетертый	

Как видно из табл. 2, лабораторные испытания данной партии реагента в ФГБУ «ЦАО» показали эффективность реагента LN-212 на уровне штатного пиротехнического состава АД-1, но значительно ниже, чем в испытаниях за 2014 г. (см. табл. 1). Предположительно более низкие результаты могут объясняться получением более грубодисперсного порошка (подтверждением этому служит и факт увеличения эффективности в случае перетертого порошка).

С целью уточнения результатов, полученных в ФГБУ «ЦАО», были проведены испытания опытно-промышленной партии реагента LN-212 в ФГБУ НПО «Тайфун», ФГБУ «ВГИ», АО «ЧПО им. В.И. Чапаева» и на стенде АНО «Агентство АТТЕХ». Подготовка образцов порошкообразного реагента для испытаний (измельчение) и их испытания проводились в полном соответствии с методикой, описанной в [7]. Отличие состояло только в регистрации формирующихся в облачной камере ледяных кристаллов. В экспериментах, проведенных в ФГБУ «ЦАО» и описанных в работе [7], ледяные кристаллы осаждались на предметное стекло, смазанное метилметакрилатом. После полимеризации пленки на ней оставались

реплики кристаллов, которые в дальнейшем подсчитывались под оптическим микроскопом. В экспериментах, проведенных в других организациях, ледяные кристаллы осаждались на предметные стекла в предварительно охлажденных термостатах и сразу же фотографировались и подсчитывались в оптическом цифровом микроскопе.

### Анализ результатов

В табл. 3 приведены результаты испытаний на льдообразующую эффективность реагента LN-212, полученные в ФГБУ «ВГИ», АО «ЧПО им. В.И.Чапаева», НПО «Тайфун» и АНО «Агентство АТТЕХ».

ЛьдообразующаяэффективностьреагентаLN-212 Ice-forming efficiency of reagent LN-212

Таблица 3

ФГБУ «ВГИ» АО «ЧПО им. В.И. Чапас		м. В.И. Чапаева»	НПО «Тайфун»		АНО «Агентство АТТЕХ»		
T, °C	Выход, г <sup>-1</sup>	T, °C	Выход, $\Gamma^{-1}$	T, °C	Выход, г-1	T, °C	Выход, г-1
-12,0	1,50.1011	-14,8	$2,76\cdot10^{10}$	_	-	-11,6	7,8.1010
-8,8	6,97.1010	-12,0	$1,97 \cdot 10^{10}$	10,2	2,30.1010	-10,1	$5,1\cdot10^{10}$
-5,5	$3,40\cdot10^{10}$	-6,6	$3,22\cdot10^{9}$	-6,2	1,70.1010	-6,3	1,3.1010

Как видно из табл. 3, в результате испытаний, проведенных в разных организациях, были получены близкие значения, но они оказались на три-четыре порядка величины ниже значений, полученных в ФГБУ «ЦАО» (см. табл. 1 и табл. 2). При этом результаты испытаний реагента LN-212 на малых аэродинамических стендах АО «ЧПО им. В.И. Чапаева» и АНО «Агентства АТТЕХ» [9], распыляемого с помощью устройства, описанного выше (см. рис. 1  $\delta$ ), оказались ниже нижнего предела чувствительности этих методик — меньше  $10^9 \, {\rm r}^{-1}$ .

Помимо упомянутых выше испытаний, в АНО «Агентство АТТЕХ» проводились испытания, в ходе которых распыление порошков в аэрозольной камере производилось как по методике, описанной в [8], так и с помощью электростатического распылителя «Лидер», который может быть использован в практической работе. Однако во всех случаях полученные в результате измерений значения выхода льдообразующих частиц составляли менее  $10^{11} \, \mathrm{r}^{-1}$ .

Полученные данные показывают, что при определении льдообразующей эффективности необходимо применять методики измерений, в которых максимально близко моделируются условия распыления порошков при активных воздействиях с помощью летательных аппаратов.

По мнению авторов, причиной низкой эффективности наноразмерных порошкообразных льдообразующих реагентов является высокая агрегируемость в таких наносистемах отдельных наночастиц кремнезема, являющаяся результатом высокой активности поверхности этих частиц.

Известно, что 1 г нанокремнезема с удельной поверхностью  $300 \text{ м}^2/\text{г}$  содержит примерно  $10^{18}$  частиц диаметром 9—10 нм. На рис. 2 приведено схематическое

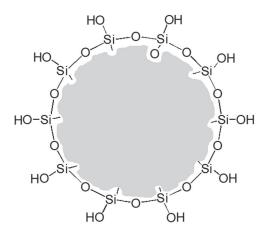


Рис. 2. Схематическое изображение частицы нанокремнезема.

Fig. 2. Schematic representation of a nanosilica particle.

изображение частицы нанокремнезема. Как видно из рисунка, поверхность каждой наночастицы покрыта гидроксильными (силанольными) группами и содержит молекулы сорбированной воды.

Благодаря водородным связям происходит взаимодействие частиц нанокремнезема (рис. 3).

Различают несколько уровней структурной иерархии пространственных структур нанокремнезема. Вначале сферические частицы нанокремнезема образуют агрегаты с линейными размерами 100—500 нм. Агрегаты, в свою очередь, объединяются в еще большие структуры — агломераты (>1 мкм), которые, в свою

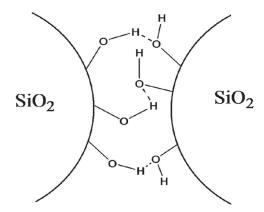


Рис. 3. Взаимодействие двух идеализированных частиц нанокремнезема.

Fig. 3. The interaction of two idealized particles of nanosilica.

очередь, образуют конгломераты (флокулы). На рис. 4 приведена фотография типичных агломератов.

Указанное выше говорит о том, что для повышения выхода льдообразующих частиц из одного грамма нанопорошка необходимо понизить высокую активность поверхности его частиц. Активность поверхности частиц можно уменьшить в результате абсорбции газов или жидкостей либо значительного ослабления межчастичных связей, например, путем:

- замещения части силанольных групп на триметилсилильные группы по реакции с триметилхлорсиланом или аналогичным соединением;
- замещения силанольных групп на бутоксильные группы по реакции с бутанолом;
- создания на поверхности частиц субмонослойного покрытия из органоолигосилоксана;
- создания на поверхности частиц субмонослойного или монослойного покрытия из водорастворимых негидроксильных полимеров, например поливинилпирролидона или полиоксиэтилена.

В настоящее время проводятся работы по разработке новых образцов наноразмерных льдообразующих реагентов с модифицированной поверхностью исходных частиц нанокремнезема путем создания на поверхности частиц монослойного покрытия из водорастворимых негидроксильных полимеров.

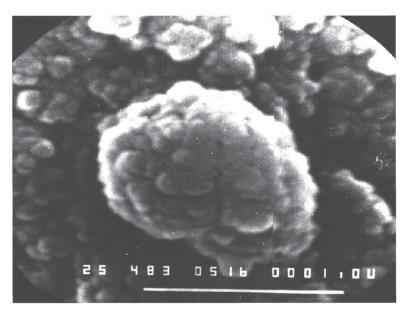


Рис. 4. Микрофотография агломератов нанокремнезема (масштаб 1 мкм). Fig. 4. Micrograph of nanosilicon agglomerates (scale 1 µm).

#### Выводы

- 1. Величина выхода для современных наноразмерных льдообразующих реагентов при температуре порядка -10 °C может составлять около  $10^{10}$ — $10^{11}$  г<sup>-1</sup>.
- 2. Высокие значения выхода для нескольких типов нанопорошков, полученные при испытаниях в ФГБУ «ЦАО» [7], противоречат данным, полученным в других организациях, и требуют более тщательного анализа с целью выявления возможных причин различия.
- 3. Предположительно низкая эффективность наноразмерных льдообразующих реагентов, возможно, связана с высокой агрегируемостью исходных наночастиц. Вероятней всего, даже после непродолжительного хранения агрегаты могут достигать 1 мкм в диаметре.
- 4. Поскольку применение наноразмерных порошкообразных реагентов в силу целого ряда их преимуществ перед пиротехническими составами представляется перспективным, то дальнейшие исследования при разработке таких порошкообразных реагентов следует направить на снижение степени их агрегируемости.

### Список литературы

- 1. *Ким Н.С., Корнеев В.П., Частухин А.В., Щукин Г.Г.* Экологические аспекты российских технологий активных воздействий на облака // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 46. С. 91—99.
- 2. Fletcher N.H. On ice crystal production by aerosol particles // J. Meteorol. 1959. V. 16. No. 2. P. 173—180.
- 3. *Никулин В.Н.*, *Чукин В.В.*, *Садыкова А.Ф*. Экспериментальные установки для исследования образования льда в атмосфере // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 38. С. 102—112.
- Ким Н.С., Шкодкин А.В. Стохастическая нуклеация льда на неоднородной поверхности / В сб.: Активные воздействия на градовые процессы и перспективы усовершенствования льдообразующих реагентов для практики активных воздействий. Труды Всесоюзного семинара. Гидрометеоиздат, 1991. С. 171—177.
- 5. Головко Л.В., Баханова Р.А., Борисенко Н.В., Юрченко Г.Р., Олейник Р.В., Киселев В.И. Исследование покрытия поверхности кремнезема йодидом серебра при его адсорбции из паровой фазы // Труды УкрНИГМИ. 1985. № 214. С. 92—95.
- Ким Н.С., Шкодкин А.В., Шилин А.Г. Эффективность генераторов льдообразующих аэрозолей // Труды ИЭМ.Вып. 48 (138). 1989. С. 171—177.
- 7. Сосников Е.В., Плауде Н.О., Воронин Е.Ф., Носач Л.В., Пахлов Е.М., Гунько В.М., Покровский В.А. Исследование эффективности наноразмерных кристаллизующих реагентов AgI/SiO<sub>2</sub> / В сб.: Вопросы физики и облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия. Памяти Н.О. Плауде. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ МЦД, 2015. С. 323—330.
- 8. *Частухин А.В.* Экспериментальные и теоретические исследования эффективности применения реагентов для воздействия на облака и туманы / Афтореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук (25.00.30). Нальчик, 2018.
- 9. *Частухин А.В., Двоеглазов С.М., Ким Н.С., Корнеев В.П.* Методические особенности оценки льдообразующей эффективности полноразмерных наземных аэрозольных генераторов // Наука. Инновации. Технологии. 2019. Вып. 4. С. 129—136.

## References

1. Kim N.S., Korneev V.P., Chastuhin A.V., Shchukin G.G. Ecological aspects of Russian technologies of active impacts on the clouds. *Uchenye zapiski RGGMU*. Proceedings of the RSHU. 2016, 46: 91-99. [In Russian].

- 2. Fletcher N.H. On ice crystal production by aerosol particles. J. Meteorol. 1959, 16 (2): 173–180.
- 3. *Nikulin V.N., Chukin V.V., Sadykova A.F.* Experimental installations for studying the formation of ice in the atmosphere. *Uchenye zapiski RGGMU*. Proceedings of the RSHU. 2015, 38: 102–112. [In Russian].
- 4. *Kim N.S., Shkodkin A.V.* Stochastic nucleation of ice on an inhomogeneous surface. Active impacts on hail processes and prospects for improving ice-forming reagents for the practice of active impacts. *Trudy Vse souznogo seminara*. Proceedings of the All-Union Seminar. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: 171–177. [In Russian].
- 5. Golovko L.V., Bakhanova R.A, Borisenko N.V., Yurchenko G.R., Oleynik R.V., Kiselev V.I. Investigation of the surface coating of silica with silver iodide upon its adsorption from the vapor phase. *Trudy UkrNIGMI*. Works UkrSIHNI. 1985, 214: 92–95. [In Russian].
- 6. Kim N.S., Shkodkin A.V., Shilin A.G. Efficiency of ice-forming aerosol generators. *Trudy IEM*. Works IEM. 1989, 48 (138): 171–177. [In Russian].
- 7. Sosnikova E.V., Plaude N.O., Voronin E.F., Nosach L.V., Pakhlov E.M., Gun'ko V.M., Pokrovsky V.A. Investigation of the efficiency of nanoscale crystallizing AgI/SiO2 reagents. Problemy fiziki oblakov. Atmosfernye aerozoli. Aktivnye vozdeistviya. Sbornik statei pamayti N.O. Plaude. Problems of the physics of clouds. Atmospheric aerosols, active effects. Collection articles memory of N.O. Plaude. Obninsk: FGBU «VNIIGMI-WDC», 2015: 323–330. [In Russian].
- 8. Chastuhin A.V. Eksperimentalnye i teoreticheskie isledovaniya effektivnosti primeneniya reagentov dlya vozdeistviya na oblaka i tumany. The dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences. Nalchik: 2018: 132 p. [In Russian].
- 9. Chastuhin A.V., Dvoeglazov S.M., Kim N.S., Korneev V.P. Methodological features of the assessment of the ice-forming efficiency of full-sized ground-spare aerosol. Nauka. Innovacii. Tehnologii. The Science. Innovation Technology. 2019, 4:129-136 [In Russian].

Статья поступила 11.12.2019 Принята после доработки в печать 18.02.2020

## Сведения об авторах

*Ким Николай Сергеевич*, д-р физ.-мат. наук, доцент, научный консультант АНО «Агентство атмосферных технологий», e-mail: adk@mail.ru, attech@mail.ru

Корнеев Виктор Петрович, канд. техн. наук, научный руководитель, АНО «Агентство атмосферных технологий», e-mail:kornvp@mail.com, attech@mail.ru

Петрунин Андрей Михайлович, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора АНО «Агентство атмосферных технологий», e-mail: a.m.petrunin@mail.ru, attech@mail.ru

Частухин Андрей Викторович, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора АНО «Агентство атмосферных технологий», e-mail: a.chastuhin@mail.ru, attech@mail

Воронин Евгений Филиппович, д-р хим. наук, профессор, старший научный сотрудник, Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины, e-mail: e.voronin@bigmir.net, info@isc.gov.ua

## Information about authors

Kim Nicolay Sergeevich, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), associate professor, scientific consultant, ANO «Agency of Atmospheric Technologies»

Korneev Viktor Petrovich, PhD (Tech. Sci.), scientific advisor, ANO ««Agency of Atmospheric Technologies»

Petrunin Andrey Mihaylovich, PhD (Phys. and Math. Sci.), deputy director, ANO «Agency of Atmospheric Technologies»

Chastuhin Andrey Viktorovich, PhD (Phys. and Math. Sci.), deputy director, ANO «Agency of Atmospheric Technologies»

Voronin Evgeny Filippovich, Grand PhD (Chem. Sci.), professor, senior researcher, Institute of Surface Chemistry A.A. Chuiko NAS of Ukraine