

УДК 551.509.616

*Н.С. Ким**, *В.П. Корнеев**, *А.В. Частухин**, *Г.Г. Щукин*****ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РОССИЙСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЛАКА*** АНО «Агентство атмосферных технологий», adk@mail.ru;

** Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

*N.S. Kim, V.P. Korneev, A.V. Chastukhin, G.G. Shchukin***ECOLOGICAL ASPECTS OF THE RUSSIAN TECHNOLOGIES OF ACTIVE IMPACTS ON CLOUDS**

В статье описываются существующие методы и реагенты, используемые в работах по активным воздействиям на облака, а также борьбы с градом. На основе анализа экспериментальных материалов по загрязнению окружающей среды при проведении активных воздействий СССР и за рубежом делается вывод об экологической безопасности применения используемых в этих работах реагентов.

Ключевые слова: активные воздействия, реагенты, экологическая безопасность, облака.

The description of the existing methods and reagents used in studies on active influence on clouds, as well as the fight against hail. Based on the analysis of experimental materials on environmental pollution during the active actions of the USSR and abroad conclusion about the environmental safety of the use of reagents in these works.

Keywords: active influences, reagents, ecological safety, clouds.

Введение

Работы по активным воздействиям (АВ) на облака в целях искусственного увеличения осадков (ИУО) и борьбы с градом проводятся в нашей стране более шестидесяти лет. В последние два десятилетия все большее распространение получают работы по защите мегаполисов и других объектов от неблагоприятных погодных явлений, связанных с облаками, такие как рассеяние облаков, снижение интенсивности ливневых осадков и пр.

В создании и совершенствовании технологий активного воздействия участвуют многие отечественные научно-исследовательские институты и промышленные предприятия. Реализация программ в области АВ в России регламентируется нормативными документами Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Работы по АВ на основе российских технологий успешно проводятся также в странах СНГ и дальнем зарубежье.

И хотя экологическая безопасность применяемых при АВ реагентов подтверждена многолетними исследованиями их влияния на окружающую среду, результаты таких исследований широкой общественности мало известны. Это подчас вызывает неоднозначные суждения о целесообразности тех или иных работ (проектов) по АВ даже кратковременного характера. Для того чтобы внести определенную ясность в эти проблемы, рассмотрим характеристики реагентов,

используемых при проведении работ по АВ на облака, технологии проведения воздействий, а также результаты исследований, посвященные этим вопросам, полученные в специализированных НИИ России и за рубежом.

1. Реагенты, используемые в работах по регулированию осадков.

Краткое описание методик АВ

Современные концепции АВ базируются на возможности трансформации микрофизической структуры облаков, находящихся в фазовой и коллоидальной неустойчивости, посредством реагентов с задаваемыми физико-химическими свойствами [4, 7]. При реализации этих концепций в качестве реагентов используются в основном вещества, обладающие высокой льдообразующей способностью в переохлажденной облачной среде – льдообразующие аэрозоли и хладореагенты. Гигроскопические реагенты используются преимущественно при воздействиях на теплые облака и в работах по АВ на территории России практически не применяются. Отдельную группу представляют порошкообразные реагенты, используемые для подавления развития (разрушения) конвективных облаков, когда при наличии конвективной (вертикальной) неустойчивости атмосферы в развивающихся конвективных облаках достаточно воздействовать малым импульсом, чтобы в облаках создавались мощные нисходящие потоки, приводящие к прекращению роста и разрушению облаков.

Льдообразующие реагенты. Применение льдообразующих реагентов основано на наличии в осадкообразующей облачности наряду с кристаллами обширных зон жидко-капельной влаги (вплоть до температур -35° ... -40° C). Поскольку насыщающая упругость водяного пара над льдом меньше, чем над водой, то при введении в такой объем достаточного количества зародышевых ледяных частиц начинается процесс «перегонки» водяного пара на эти частицы и испарение облачных капель.

Существуют три основных способа доставки реагента в облака: ракетный, самолетный и посредством наземных аэрозольных генераторов (рис. 1).

В СССР был накоплен значительный опыт использования льдообразующих реагентов в работах по борьбе с градом с использованием противоградовых ракет [6].

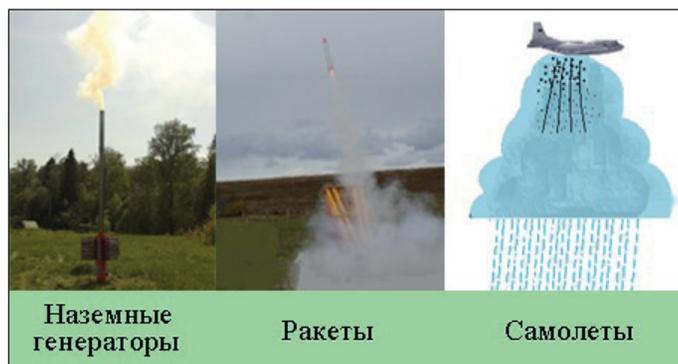


Рис. 1. Способы доставки льдообразующего реагента

В настоящее время интенсивные работы по ИУО с использованием противораковых ракет проводятся в Китае. В российских технологиях АВ льдообразующие реагенты вводятся в облака в основном с помощью специальных самолетных пиротехнических генераторов (патроны, шашки). В других странах (Франция, Испания, Бразилия и т.д.) для целей АВ применяют наземные генераторы, когда реагент сжигается в горючих смесях и с восходящими потоками воздуха поступает в облака.

При выборе реагентов немаловажную роль играет их стоимость и экологическая безопасность. В мировой практике АВ, включая Россию, наибольшее распространение получили льдообразующие пиротехнические составы на основе йодистого серебра (AgI). Это обусловлено высокой льдообразующей способностью аэрозоля этого вещества, устойчивостью к термической возгонке, экологической безопасностью. При сгорании грамма пиротехнических смесей с 8-процентным содержанием AgI выход активных ядер кристаллизации при температуре среды – 10 °С составляет не менее 5×10^{12} частиц. Высокая активность AgI объясняется наибольшей близостью его кристаллографической структуры к структуре льда.

Для засева облаков по модификации осадков самолетным методом российскими предприятиями выпускаются пиропатроны двух типов: ПВ-50-М калибра 50 мм и ПВ-26-01 калибра 26 мм. Их технические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика	ПВ-50М	ПВ-26-01
Масса пиротехнического состава, г	320	40
Время горения, с	55	45
Длина трассы засева, м	2500	2000
Выход льдообразующих ядер с 1 г состава при температуре –10 °С, г ⁻¹	5×10^{12}	1×10^{13}

При воздействии на конвективные облака с помощью пиропатронов реагент вводится путем их отстрела при пролете самолета над вершинами облаков. Схема засева таких облаков представлена на рис. 2.

В случае воздействия на мощные конвективные облака, верхняя граница которых превышает практический потолок подъема используемых самолетов, введение реагента в облака (отстрел) производится на уровне реально возможного пролета

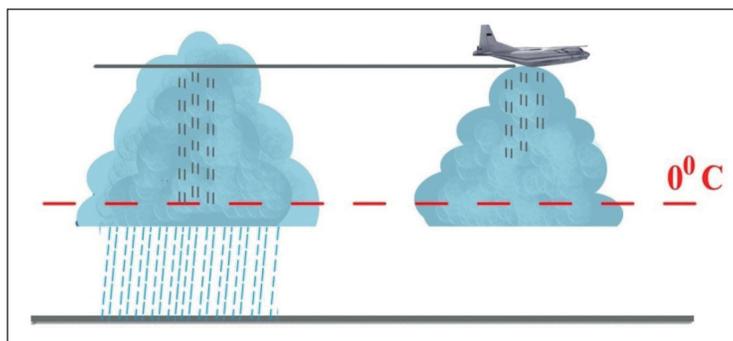


Рис. 2. Схема засева конвективных облаков

воздушного судна. При проведении АВ на многовершинные конвективные облака в среднем расходуется до 20 пиропатронов ПВ-26-01 или до 2 пиропатронов ПВ-50-М на одну облачную ячейку. Нормы расхода при засеве каждой вершины облачных кластеров аналогичны нормам для изолированных облаков. Общий расход пиропатронов при проведении работ по АВ на конвективные облака определяется масштабами воздействий и повторяемостью того или иного вида кучевых облаков, пригодных для засева.

При АВ с целью ИУО из слоистообразных облаков засеивание осуществляется обычно вдоль линии, перпендикулярной направлению смещения облачности (рис. 3).

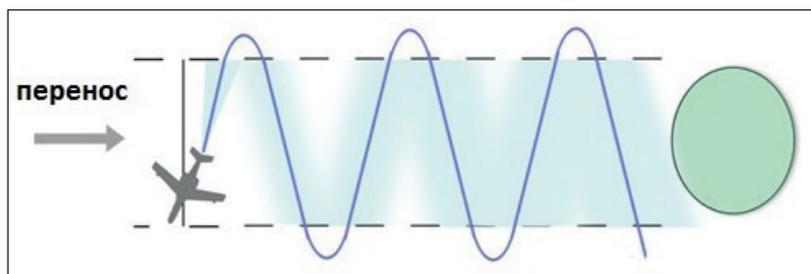


Рис. 3. Схема засева слоистообразных облаков

При этом ширина засеиваемой полосы за счет переноса реагента турбулентными потоками возрастает до 3–4 км, а глубина зоны вызываемых засеиванием дополнительных осадков обычно превышает расстояние ее 2-часового переноса. Одноразовый засеивание вдоль расчетной линии обеспечивает на площади мишени выпадение лишь некоторого ограниченного объема дополнительных осадков. Для того чтобы увеличить эффективность воздействий, необходимо непрерывно продолжать засеивание натекающей на мишень облачности вдоль выбранной линии. Полосы засеивания постепенно расширяются за счет турбулентности атмосферы так, что при правильно рассчитанной схеме засеивания происходит их слияние в сплошную зону еще до достижения ими площади мишени [11].

Хладореагенты. В качестве хладореагентов в российских технологиях АВ используются сухой лед (CO_2) и жидкий азот (N_2). Сухой лед вызывает образование кристаллов льда при температуре облака до -1°C . Принцип засеивания сухим льдом состоит в том, что при падении в толще облака гранул CO_2 за счет их низкой температуры (около -80°C) воздух в непосредственной близости от траектории падения охлаждается до температуры ниже -40°C . В результате происходит спонтанное замерзание переохлажденных капель, являющихся в последующем основной механизма осадкообразования.

Засеивание осуществляется путем дозированного сброса в облака гранул CO_2 размером от 0,2 до 2,0 см при пролете самолета над верхней границей засеиваемого слоя. При использовании твердой углекислоты расход реагента составляет от 0,15 до 1,0 кг на 1 км трассы самолета.

Применение жидкого азота (температура кипения -196°C) также основывается на использовании его низкой температуры для резкого охлаждения облачной

среды. Выход активных ядер кристаллизации с 1 грамма жидкого азота составляет примерно 10^{13} ядер/г. При этом происходит генерация мелкодисперсных ледяных частиц. В отличие от засева гранулами твердой углекислоты образование частиц льда под действием N_2 происходит лишь вдоль трассы полета самолета. Поэтому на практике такой метод используется преимущественно для засева относительно тонких переохлажденных облачных слоев, например, для их рассеивания или как дополнительное средство при использовании AgI или CO_2 . Существенными достоинствами засева облаков с использованием жидкого азота являются его наиболее высокие среди всех реагентов температурный порог действия ($-0,5^\circ C$) и экологичность.

Порошкообразные реагенты. При проведении работ по уменьшению осадков и борьбе с градом для подавления развития конвективных облаков или их разрушения применяют также грубодисперсные порошкообразные реагенты, вводимые в вершины облаков с помощью самолетных средств. При этом в облаке создаются мощные динамические импульсы скорости, направленные вниз. Эффективность действия реагентов зависит от их состава, гидрофильности, удельного веса и дисперсности. Взаимодействие гидрофильных частиц с облачными каплями приводит к быстрому укрупнению последних до размера дождевых и усилению нисходящего потока выпадающими осадками. Вследствие этого при прочих равных условиях процесс разрушения облаков за счет более высоких скоростей нисходящих движений протекает быстрее, чем их рост.

Оптимальная дисперсность порошка (суммарная поверхность всех частиц на единицу веса), обеспечивающая наиболее высокую степень увлечения падающим аэрозольным облаком облачной массы, составляет примерно $3000\text{ см}^2/\text{г}$. Этому значению дисперсности соответствует средний размер частиц около 5 мкм. В качестве таких реагентов могут использоваться белая глина, окись меди, песок и т. д. Наиболее полно указанным свойствам отвечает, например, обычный строительный цемент, состоящий из природных глиноземов с 4-процентной добавкой гипса. Расход порошкообразных реагентов составляет около 5 кг на конвективное облако высотой один километр. Для мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков нормы расхода реагента возрастают и для изолированного облака равны 25–30 кг.

Детальное описание методов и технических средств АВ на облака в целях искусственного увеличения и уменьшения осадков представлено в [8, 10].

2. Загрязнение окружающей среды реагентами

Загрязнение льдообразующими реагентами на основе AgI. Необходимо отметить, что Государственным комитетом по гидрометеорологии и контролю окружающей среды СССР уделялось большое внимание экологическим аспектам активных воздействий. В 70–80-е гг. в Высокогорном геофизическом институте, Центральной аэрологической обсерватории, Главной геофизической обсерватории проводились комплексные исследования загрязнения природной среды в районах многолетнего применения льдообразующих реагентов, включая составы с AgI. Комплексные исследования проводились на Северном Кавказе и Молдавии, где противогородовые работы с использованием йодистого серебра проводились в течение нескольких десятилетий. Повышенное внимание к реагентам на основе AgI связано с тем, что это вещество, а также йод, содержащийся в продуктах сгорания пиротехнических

смесей, относятся, в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76, ко второму классу опасности. Йодид серебра практически не растворяется в воде. Однако постоянное присутствие в атмосфере аммиака, соединений цинка, сульфатов приводит к быстрому разложению AgI, вследствие чего в водных средах всегда имеются не связанные ионы серебра и йода. В связи с этим фактически речь идет об экологическом влиянии на природную среду этих веществ при введении данного реагента в облачную атмосферу. Спрогнозировать уровень загрязнения окружающей среды серебром при работах по модификации осадков можно, проанализировав данные о содержании компонентов реагента в районах систематического и интенсивного его применения, например, в районах проведения противоголодных работ.

Исследованиями установлено, что концентрация серебра в воздухе в сезоны голодозащиты на Северном Кавказе составляла в среднем от $6,4 \times 10^{-5}$ до $8,3 \times 10^{-5}$ мкг/м³ [2], в Молдавии – от 0,001 до 0,043 мкг/м³ [12], что на несколько порядков ниже величины предельно допустимых концентраций (ПДК = 10 мкг/м³). В годовом ходе концентраций серебра в Молдавии максимальные значения приходились на летний период, а минимальные – на осенне-зимний период, что в принципе соответствует естественному распределению концентраций практически любых аэрозолей природного происхождения.

Из полученных экспериментальных данных следует, что аэрозоль серебра в свободной атмосфере обнаруживается на расстоянии более 100 км от районов активных воздействий в направлении переноса засеянных реагентом облаков [2, 5].

Низкое содержание серебра отмечается и в открытых водоемах, расположенных на защищаемых от града территориях (ЗТ). Так, в Молдавии в водоемах ЗТ за весь девятилетний период наблюдений после сезонов противоголодной защиты концентрация серебра находилась в пределах 1,7...7,4 мкг/л, в водоемах контрольной территории (КТ) – 0,9...4,1 мкг/л при ПДК серебра в воде 50 мкг/л. Таким образом, не выявлена корреляция между приращением содержания Ag и сезонными расходами кристаллизующих составов на основе AgI.

Природные источники поступления серебра в атмосферу оцениваются примерно в 70 т/год, антропогенные – в 2290 т/год. В работах по АВ ежегодно в мире расходуется до 10 т серебра.

Для оценки нагрузок AgI на окружающую среду при проведении работ по ИУО самолетным методом в табл. 2 приведены сравнительные данные по АВ в Сирии, Иране и Якутии [9].

Таблица 2

Сравнительные характеристики расхода AgI в различных проектах АВ

Цель проекта, страна	Годы реализации проектов	Площадь проведения работ по АВ, тыс. км ²	Среднее количество дней с АВ за сезон	Средний сезонный расход AgI в год, г/км ²	Средний расход AgI за сезон АВ, г/км ²
Сирия, ИУО	1992–1997	150	35	81759	0,545
Иран, ИУО	1999–2001	125 (1999 г.)	31	13432	0,107
		280 (2000 г.)		15394	0,055
		385 (2001 г.)		17849	0,046
Якутия, ИУО	1995–1997, 2003–2005	1500	9	7337	0,005

Сирийский проект по увеличению осадков является наиболее масштабным из всех известных к настоящему времени. Сезонный расход йодистого серебра в этом проекте составлял более 81 кг при площади работ 150 тыс. км². Таким образом, ежегодно количество йодистого серебра, рассеянного в слое атмосферы от 2 до 5 км в районе АВ, составляло в среднем 0,545 г/км². В других проектах по ИУО расход AgI был еще ниже.

В этой связи можно утверждать, что изменение природного фона серебра, с точки зрения его накопления и отрицательного действия на объекты природной среды при работах по АВ с использованием пиротехнических составов с 8-процентным содержанием йодистого серебра, при реализации российских технологий отсутствует.

Отсутствуют также примеры отрицательного влияния йода как результат использования в качестве реагента при проведении воздействий на облака йодистого серебра. Йод достаточно широко распространен в природе и является одним из жизненно важных химических элементов. Каких-либо превышений содержания йода за пределами вариации его природной концентрации не наблюдалось. Данные по сезонной изменчивости йода в атмосферных осадках характеризуют повышение его концентрации в теплый период, что связывается с природными источниками поступления: моря, океаны и т.д. Фоновое содержание йода в осадках на Европейском континенте в удаленных от антропогенных источников районах составляет 0,0023 мг/л, в воздухе вблизи морей концентрации могут достигать 50,0 мг/л.

Исследования на Северном Кавказе в период противоработ показали среднюю концентрацию йода в осадках в дни с воздействиями 0,011 мг/л, при средних значениях без проведения воздействий 0,0015 мг/л [3], что является также одним из фактов, подтверждающих вымывание вносимого в облака AgI на земную поверхность.

При использовании для борьбы с градом или для увеличения осадков наземных генераторов попадание льдообразующего реагента в почву и в водоемы возможно двумя путями: при непосредственном взаимодействии аэрозольной струи из генератора с подстилающей поверхностью и выпадение реагента с осадками. При этом основным загрязняющим веществом при работе ацетоновых и пиротехнических генераторов является йодистое серебро, поступающее в атмосферу в виде высокодисперсных частиц размером менее 0,1 мкм. Такие частицы являются неседиментационными, поскольку их скорость гравитационного осаждения чрезвычайно мала [13]. Поэтому их осаждение на подстилающую поверхность возможно только за счет броуновской диффузии. Обычно введение аэрозольной струи из генератора в атмосферу производится на высоте не менее 1 м от поверхности Земли. Оценить осаждение частиц реагента на подстилающую поверхность за счет этого механизма можно по модели осаждения аэрозоля при его прохождении в плоскопараллельном канале [13] и с учетом механизма распространения аэрозольной струи в атмосфере [1, 14]. Проведенные оценки показали, что количество йодистого серебра, осаждаемого на поверхность Земли вблизи места установки генератора пренебрежимо мало по сравнению с общим количеством йодида серебра, поступившим в атмосферу. Эти оценки подтверждаются экспериментальными данными, полученными при изучении загрязнения почвы после проведения работ по активным воздействиям

на территории Греции [16, 17], где воздействие выполнялось в основном с помощью наземных генераторов, и данными, полученными на территории Сьерра-Невады (США) [15], где также применялись наземные генераторы.

Загрязнения окружающей среды хладореагентами. Экологическая безопасность применения при АВ хладореагентов достаточно очевидна. При использовании твердой углекислоты и жидкого азота происходит их переход в газообразное состояние и смешение с атмосферным воздухом, природными составляющими которого они являются. Содержание данных газов в общем составе сухого воздуха оценивается в 0,033 и 78 % соответственно. Поэтому даже при максимальном введении в облака, например сухого льда, увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере составляет менее 10^{-9} от его поступления от природных и 10^{-6} от антропогенных источников.

Загрязнения окружающей среды порошкообразными реагентами. При оценках возможного отрицательного влияния АВ на окружающую среду часто акцентируют внимание на применении порошкообразных реагентов, в частности цемента. Цементная пыль в высоких концентрациях способна вызывать заболевания глаз, кожи, дыхательных путей. ПДК цемента в воздухе – $6,0 \text{ мг/м}^3$. Как уже ранее указывалось, достаточной нормой реагента для засева облаков мощностью 1 км является 5 кг порошка, а для мощных кучевых и кучево-дождевых облаков – 25–30 кг. Простые расчеты показывают, что при введении такого количества цемента в вершину конвективного облака высотой 5 км (диаметр ячейки 1 км) и перемещающегося с $V \approx 30 \text{ км/ч}$, кратковременная предельная концентрация частиц реагента в подоблачном слое составит не более 1 мг/м^3 . Анализ суммарного расхода порошкообразного реагента при проведении работ по созданию благоприятных погодных условий в мегаполисах показывает, что максимальное количество выпадающего грубодисперсного порошка на 1 км^2 не превышает 20–30 г за один день воздействий. Это составляет ничтожную долю от выпадающих на подстилающую поверхность частиц природного происхождения (перенос ветром почвы, песка, выбросов вулканической деятельности, солевых частиц от испарения капель над поверхностью океанов и т.д.).

Таким образом, очевидно, что при проведении работ по АВ загрязнение атмосферы, водоемов и почвы территорий вносимыми в облака реагентами ничтожно мало и отрицательные последствия АВ исключаются.

Выводы

1. Реализуемые на основе российских технологий проекты по активному воздействию на облака не представляют угрозы загрязнения окружающей среды используемыми реагентами в районах многолетних работ.

2. Расширение работ по активным воздействиям на облака и возрастающий интерес к проблемам экологического характера диктуют необходимость дальнейших исследований последствий работ по активным воздействиям на облака.

Литература

1. Бывова Н.Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы // Ин-т экспериментальной метеорологии. – М.: Гидрометеиздат, 1974. – 191 с.

2. Воробьева Т.И. О влиянии противоголовоградных работ на изменение концентрации серебра на Северном Кавказе // Тр. ВГИ, 1982. Вып. 51. – С.127–139.
3. Гаджиева М.М. Содержание йода в атмосферных осадках в районе активных воздействий // Тр. ВГИ, 1987. Вып. 69. – С. 87–92.
4. Денис А. Изменение погоды засевом облаков. – М.: Мир, 1983. – 271 с.
5. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Сивак О.А., Шукин Г.Г. Исследование эффективности метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала // Учен. зап. РГГМУ, 2016. № 42. – С. 109–116.
6. Диневич Л.А., Диневич С.Е., Леонов М.П., Серегин Ю.А., Берюлев Г.П. Изменение осадков противоголовоградной защитой. – Иерусалим, 1998. – 296 с.
7. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 455 с.
8. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 341 с.
9. Корнеев В.П. Опыт работ по искусственному вызыванию осадков методами активных воздействий // Сб. докл. Межд. конф., посвящ. 50-летию начала работ по защите сельскохоз. культур от градобитий в Республике Молдова. – «Спец. служба по активному возд. на гидрометеорологич. процессы РМ», 2014. – С. 100–109.
10. Корнеев В.П., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Современное состояние и перспективы применения авиационной технологии активного воздействия на облака для метеозащиты от аномальных явлений погоды и последствий техногенных катастроф // Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. Вып. 650. – С. 109–121.
11. Методические указания. Проведение работ по искусственному увеличению осадков из слоистообразных облаков. РД 52.11.646-2003. – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – 39 с.
12. Потапов Е.И. Влияние долговременных работ по активным воздействиям на градовые процессы в Республике Молдова на содержание компонентов кристаллизующих реагентов в объектах природной среды и характеристики ледяных ядер // Вопр. физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия: сб. статей памяти Н.О. Плауде. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2015. – С. 281–303.
13. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с.
14. Шукин Г.Г., Корбан Д.В., Жуков В.Ю. Радиолокационное обнаружение, распознавание и измерение концентрации радиоактивного аэрозоля в безоблачной турбулентной атмосфере // Учен. зап. РГГМУ, 2013. № 30. – С. 83–92.
15. Stone R.H. (1986). Sierra Lakes Chemistry Study // Final Report to Southern California Edison Co., Contract No. C2755903.
16. Tsiouris E.S., A.F. Aravanopoulos, N.L. Papadoyiannis, K.M. Sofoniou, N. Polyzopoulos, M.M. Christodoulou, F.V. Samanidou, A.G. Zachariadis, H.-I.A. Constantinidou (2002a). Soil Silver Content of Agricultural Areas Subjected to Cloud Seeding with Silver Iodide // Fresenius Environmental Bulletin, 11, 697–702.
17. Tsiouris E.S., A.F. Aravanopoulos, N.L. Papadoyiannis, K.M. Sofoniou, F.V. Samanidou, A.G. Zachariadis, H.-I.A. Constantinidou (2002b). Soil Silver Mobility in Areas Subjected to Cloud Seeding with AgI // Fresenius Environmental Bulletin, 12, 1059–1063.