

## О ПРИМЕНЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТ ПО АКТИВНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ОБЛАКА И ТУМАНЫ

*С.В. Антонов<sup>1</sup>, А.А. Бычков<sup>1</sup>, В.П. Корнеев<sup>1</sup>, Б.Н. Сергеев<sup>1</sup>,  
А.В. Частухин<sup>1</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

Приводятся результаты экспериментальных исследований (численных экспериментов) по оценке возможности применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проведении работ по активному воздействию (АВ) на облака и туманы. Представлено описание разработанных технических средств, которыми оснащаются БПЛА для проведения работ по АВ и обеспечения этих работ данными о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы.

*Ключевые слова:* активные воздействия, беспилотные летательные аппараты, пограничный слой атмосферы, низкая облачность, переохлажденный туман.

## THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR SUPPORT OF WORKS ON WEATHER MODIFICATION OF CLOUDS AND FOG

*S.V. Antonov<sup>1</sup>, A.A. Bychkov<sup>1</sup>, V.P. Korneev<sup>1</sup>, B.N. Sergeev<sup>1</sup>,  
A.V. Chastuchin<sup>1</sup>, G.G. Shchukin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> The Autonomous Nonprofit Organization «Agency of Atmospheric Technologies»

<sup>2</sup> Mozhaisky Military Space Academy

The article considers the results of numerical experiments aimed to assess the possibility of weather modification of clouds and fog by means of unmanned aerial vehicles. The authors present a description of UAV equipment that is intended for weather modification works and provides data on the vertical wind profile in the atmospheric boundary layer.

*Keywords:* unmanned aerial vehicles, sensing of the atmospheric boundary layer, work on weather modification of supercooled fog.

### Введение

Активные воздействия на различные формы облачности и туманы в интересах тех или иных отраслей экономики по-прежнему представляют собой одно из востребованных направлений деятельности [3].

С точки зрения используемых технических средств технологии воздействия на облака можно разделить на два типа: самолетные и наземные.

К самолетным средствам воздействия относятся генераторы, стационарно устанавливаемые на борту самолета, и генераторы, отстреливаемые с борта самолета непосредственно в облако.

Современные самолетные технологии АВ широко применяются для борьбы с градом, при проведении работ по искусственному регулированию осадков, в том числе работы по искусственному увеличению осадков (ИУО) в интересах гидроэнергетики и сельского хозяйства, работы по борьбе с лесными пожарами и работы по искусственному уменьшению летних и зимних осадков в интересах коммунальных служб крупных городов.

В наземных технологиях в первую очередь используются генераторы, которые диспергируют реагент непосредственно с поверхности Земли. В результате многолетних теоретических и экспериментальных исследований, выполненных как в России, так и за рубежом, были разработаны технические средства и методики их применения в стационарном и мобильном вариантах [7]. Так, в 2001 г. на их основе была разработана автоматизированная система воздействия, позволяющая проводить работы по АВ с целью рассеяния переохлажденных туманов на автодорогах и в аэропортах. Следует отметить, что в мировой практике проведения работ по АВ наземные генераторы (НАГ) нашли широкое применение при проведении работ с целью ИУО и для борьбы с градом [3].

В настоящее время активно ведутся работы по модернизации существующих и разработке новых технических средств воздействия с целью уменьшения стоимости работ по АВ. Достичь максимального снижения стоимости выполнения работ по АВ без снижения эффективности возможно с привлечением к выполнению работ по АВ беспилотных летательных аппаратов [3, 4].

До последнего времени трудно было представить возможность использования беспилотных систем при проведении работ по АВ ввиду узкой направленности сферы их применения. Все ранее разрабатываемые беспилотные системы использовались в основном в военных целях и в большинстве случаев выполняли свой полет на большой высоте вне полей облачности.

В последние годы стали появляться беспилотные комплексы среднего класса, что позволило расширить сферу применения БПЛА в народнохозяйственных целях. Современные БПЛА позволяют осуществлять подъем полезной нагрузки общей массой от 1 до 30 кг и выполнять полеты длительностью от 2 до 4 часов.

В связи с этим весьма актуальной становится задача по оценке эффективности применения БПЛА в работах по АВ. Одним из основных инструментов, позволяющих произвести такую оценку, является численное моделирование процесса воздействий. Преимуществом такого моделирования является возможность определения степени влияния таких факторов, как метод проведения воздействия, тип применяемых технических средств и режим их функционирования, на эффективность работ по АВ с учетом конкретных синоптико-климатических и географических условий, характерных для данного района.

Целью данной работы является выполнение численных расчетов по оценке эффективности применения беспилотных летательных аппаратов при проведении работ по активному воздействию на облака и туманы.

### Использование БПЛА для АВ на облака

С целью определения возможности применения в работах по искусственному увеличению осадков БПЛА и оценки их эффективности были проведены численные эксперименты по моделированию активных воздействий на облака с борта БПЛА с помощью трехмерной численной модели SeedDisp [1].

Модель SeedDisp предназначена для расчета переноса реагента в заданном трехмерном поле ветра. Модель ограничена мезомасштабной областью расчета с размерами по горизонтали от нескольких десятков до нескольких сотен километров и по вертикали включает всю тропосферу. В качестве исходных данных в модели используются данные наземных метеорологических наблюдений, радиозондирования атмосферы, а также данные о рельефе местности. Результаты расчетов, выполненных с помощью модели, позволяют определить, как осуществляется перенос реагента в подоблачном слое, достигает ли реагент нижней границы облака и какова при этом его концентрация при проведении АВ генераторами различных типов с использованием в качестве реагента йодистого серебра и жидкого азота.

С целью проверки эффективности применения БПЛА в работах по АВ на облака были выполнены численные расчеты переноса поля реагента в подоблачном слое при проведении АВ с помощью самолетных аэрозольных генераторов AgI, установленных как на самолете (рис. 1 а), так и на БПЛА (рис. 1 б).

Технические характеристики генераторов AgI приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики пиротехнических генераторов AgI

Время работы	4 мин
Расход состава	0,3 г/с
Выход льдообразующих ядер при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$1,0 \cdot 10^{13}$ част./г
при температуре $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0,2 \cdot 10^{13}$ част./г

Расчеты были проведены для реальных метеорологических условий с учетом рельефа местности для территории Крымского полуострова.

В качестве исходной информации использовались следующие данные:

- наземной метеорологической станции (г. Севастополь);
- аэрологической станции радиозондирования (г. Симферополь);
- о рельефе местности;
- высота воздействия 2000 м;
- длительность воздействий 1 ч;
- скорость полета
  - для самолета 340 км/ч,
  - для БПЛА 120 км/ч.

Ниже представлены горизонтальные сечения полей концентрации частиц реагента на высоте 2 км через 1 ч после начала воздействия, выполненного с помощью БПЛА (рис. 2 а) и с помощью самолета (рис. 2 б).

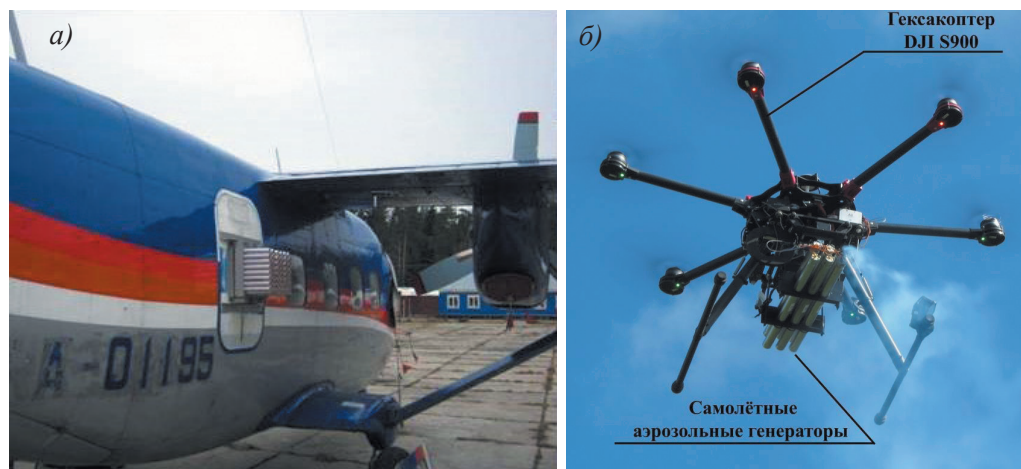


Рис. 1. Общий вид генераторов AgI, установленных на самолете Ан-28 (а) и БПЛА (б).

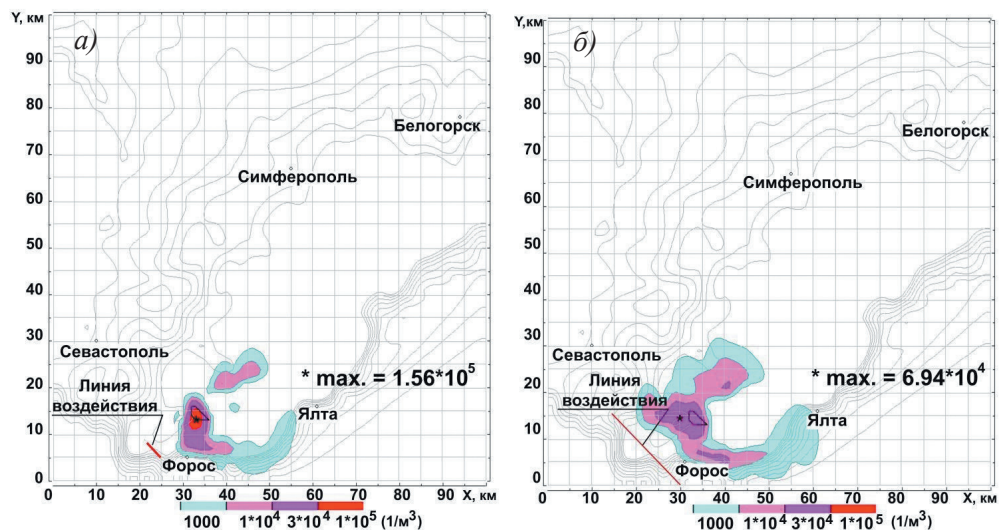


Рис. 2. Горизонтальное сечение полей концентрации частиц реагента на высоте 2 км через 1 ч после начала воздействия с борта БПЛА (а) и самолета (б).

Из рис. 2 видно, что полученные в результате расчетов максимальные значения концентрации частиц реагента в подоблачном слое при воздействии как с самолета, так и с борта БПЛА достигают значений, которые позволяют реализовать микрофизическую концепцию засева облаков (не менее  $10^4$  част./ $m^3$ ) и обеспечить искусственное увеличение количества осадков [3].

При этом следует отметить, что использование БПЛА для АВ на облака накладывает на них определенные требования:

- длительное нахождение БПЛА в условиях высокой влажности и низких температур при полете в облаках, а также в подоблачном слое;
- устойчивость БПЛА к условиям сильной турбулентности;
- наличие на борту БПЛА антиобледенительной системы;
- включение в штатную систему управления БПЛА канала для управления средствами воздействия;
- обеспечение требований безопасности при организации и выполнении полетов.

### Использование БПЛА для АВ на переохлажденные туманы

Для оценки возможности применения БПЛА в работах по АВ на переохлажденный туман и определения их эффективности были выполнены численные эксперименты по моделированию АВ с использованием нестационарной трехмерной численной модели FogSeeding. Эта модель позволяет производить численное моделирование АВ на туман с целью его рассеяния при отрицательной температуре воздуха с помощью стационарных и мобильных азотных генераторов. Данная численная модель подробно описана в работе [6].

Для иллюстрации результатов численного моделирования воздействия на переохлажденный туман рассмотрим реальную ситуацию. 10 февраля 2015 г. в Московской области в районе пересечения трассы М5 «Урал» с выездной дорогой из г. Жуковский наблюдались синоптические условия, при которых образовался туман с дальностью видимости менее 30 м, в результате чего произошло крупное ДТП.

В качестве исходной метеорологической информации использовались наземные данные о температуре и относительной влажности воздуха, направлении и скорости ветра, а также данные радиозондирования атмосферы, полученные на станциях Лыткарино и Электроугли.

С помощью модели FogSeeding проведены численные эксперименты по оценке результативности воздействия на переохлажденный туман с использованием БПЛА с помощью пиротехнических генераторов (AgI) и мобильных наземных аэрозольных генераторов (НАГ) жидкого азота ( $N_2$ ).

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики применяемых реагентов [5].

Таблица 2

Характеристики применяемых реагентов

Реагент	Выход льдообразующих ядер с 1 г
Пиротехнический состав АД-1 (8 % AgI)	$1 \cdot 10^{13}$
Жидкий азот ( $N_2$ )	$4 \cdot 10^{11}$

Воздействие с помощью мобильного НАГ (AgI) осуществлялось при движении по дороге, а воздействие с помощью НАГ жидкого азота ( $N_2$ ) — с борта БПЛА

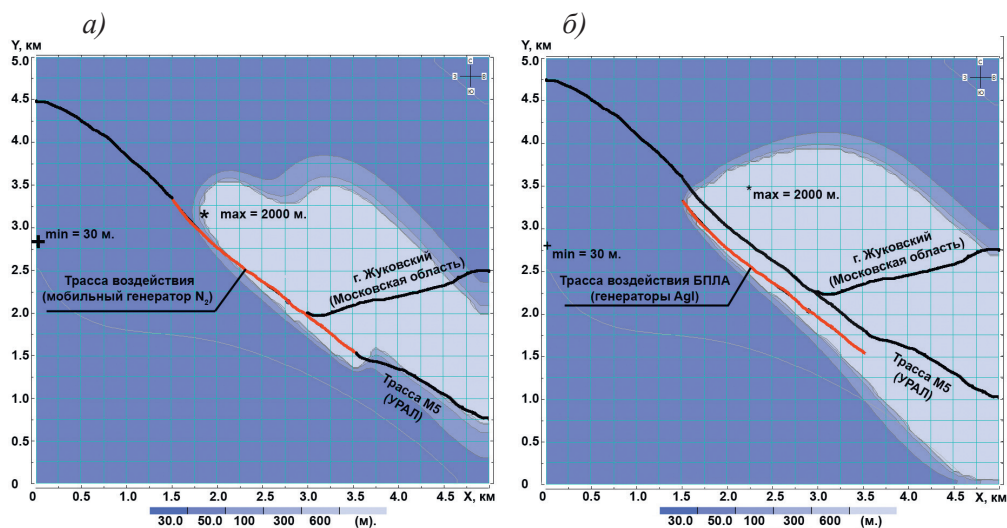


Рис. 3. Горизонтальные сечения дальности видимости через 30 минут после начала воздействия мобильным наземным аэрозольным генератором ( $N_2$ ) (а) и БПЛА с пиротехническими аэрозольными генераторами AgI (б).

на высоте 100 м по траектории, построенной с учетом скорости и направления ветра в приземном слое. Все воздействия производились в течение одного часа. По результатам выполненного численного моделирования оценено изменение дальности видимости в районе проведения работ за время проведения воздействия, а также в течение последующих 30 минут с интервалом 10 минут.

На рис. 3 приведены результаты расчета зон искусственного рассеяния тумана. Как видно из рисунков, воздействия с помощью пиротехнических аэрозольных генераторов (AgI) с борта БПЛА и мобильного НАГ ( $N_2$ ) позволили увеличить дальность видимости на уровне поверхности Земли с 30 до 2000 м. При этом площадь максимального увеличения дальности видимости при воздействиях с помощью БПЛА составила 6,9 км<sup>2</sup>, а при воздействиях с использованием мобильного НАГ — 4,3 км<sup>2</sup>. Столь значительная разница в результативности рассеяния переохлажденного тумана объясняется высотой проведения воздействия.

Следует отметить, что представленные на рис. 3 горизонтальные сечения дальности видимости подтверждают важность учета скорости и направления ветра при построении траекторий для проведения воздействий. Так, в результате воздействия с борта БПЛА по траектории, учитывающей скорость и направление ветра, удалось увеличить горизонтальную дальность видимости не только вдоль автомобильной дороги, но и на удалении до 250 м от нее.

Таким образом, результаты численного моделирования воздействия на переохлажденный туман подтверждают перспективу использования БПЛА в работах АВ на переохлажденные туманы.

## Использование БПЛА для обеспечения работ по АВ

Многолетний опыт проведения работ с применением НАГ показал, что одним из ключевых факторов, определяющих распространение аэрозольного облака льдообразующих частиц, образующегося в результате их работы, является вертикальный профиль скорости и направления ветра в пограничном слое атмосферы.

Оперативно получаемая информация о профиле ветра в пограничном слое атмосферы необходима как для определения мест установки генераторов и режима их работы на этапе планирования АВ, так и для контроля результатов работ.

В настоящее время основным источником данных о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы являются данные радиозондирования атмосферы. В то же время редкий выпуск радиозондов (один-два раза в сутки) и ограниченное число пунктов радиозондирования практически не позволяют использовать эти данные в качестве оперативного источника информации о вертикальном профиле ветра.

Среди других методов оперативного получения профиля ветра в пограничном слое достаточно широко используются дистанционные методы зондирования атмосферы [4].

В результате анализа существующих методов и средств ветрового зондирования атмосферы в Агентстве атмосферных технологий была создана мобильная система получения данных о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы с использованием дропзонда (рис. 4), сбрасываемого с борта БПЛА.

Основные технические характеристики системы приведены в табл. 3.

Проверка работы системы ветрового зондирования была выполнена в 2016 г. с использованием гексокоптера DJI S900 (рис. 5 а) в ряде натуральных экспериментов, а в октябре 2018 г. был проведен эксперимент по сбросу дропзонда с разработанного БПЛА самолетного типа Skywalker 1680 (рис. 5 б).

Летно-технические характеристики разработанных БПЛА приведены в табл. 4.

В качестве примера на рис. 6 представлено сравнение данных о направлении и скорости ветра, полученных в ходе эксперимента при сбросе дропзонда в дер.

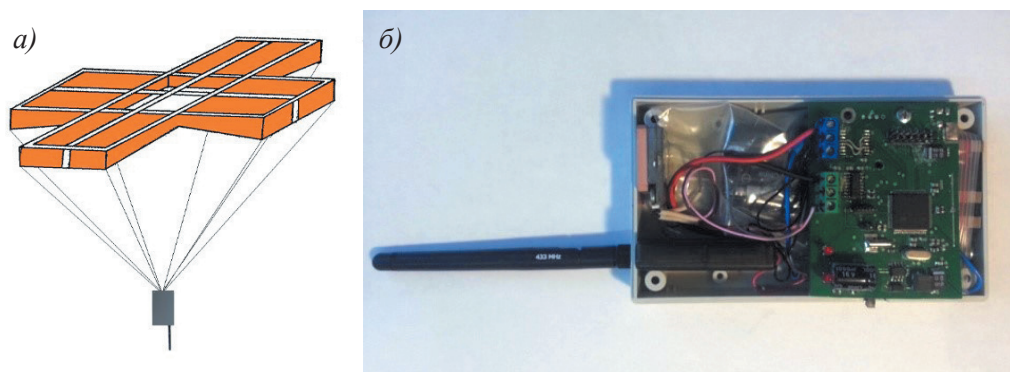


Рис. 4. Общий вид дропзонда.

Таблица 3

## Основные технические характеристики системы ветрового зондирования

№ п/п	Наименование характеристики	Значение параметра
<i>Дронзонд</i>		
1	Используемая навигационная система	GPS/ГЛОНАСС
2	Период обновления навигационных данных	1 с
3	Способ передачи данных	По радиоканалу
4	Вид передачи данных	Цифровые пакеты данных переменной длины с проверкой достоверности CRC16
5	Передаваемые данные	Широта, долгота, высота, всемирное время, скорость, курс, число видимых спутников
6	Рабочее положение радиозонда	Свободное падение на парашюте
7	Скорость падения радиозонда	2—3 м/с
8	Максимальная высота сброса радиозонда	5 км
9	Максимальное расстояние передачи данных	15 км
10	Время непрерывной работы радиозонда	3 ч
11	Габаритные размеры радиозонда	120×80×35 мм
12	Масса снаряженного радиозонда	350 г
13	Состав наземной станции	Антенна, радиоприемник, ноутбук
<i>Наземная станция</i>		
1	Диапазон радиочастот	433 МГц, LPD, выделенный для пользования гражданских лиц на всей территории РФ
2	Метод передачи данных	LoRa, широкополосная помехоустойчивая передача данных по радиоканалу малыми мощностями
3	Периодичность обновления и передачи данных	5 с
4	Радиус действия в составе системы	5000 м
5	Высота действия в составе системы	2000 м
6	Условия эксплуатации наземной станции	
	– максимальная высота	3000 м
	– температура окружающего воздуха	от 5 до 40 °С
	– относительная влажность	до 98 %
7	Габаритные размеры: Д×Ш×В	690×336×50 мм
8	Масса	0,925 кг

Таблица 4

## Летно-технические характеристики БПЛА

Параметр	Значение параметра	
	Гексакоптер DJI S900	БПЛА самолетного типа Skywalker 1680
Высота полета	до 2000—2500 м	до 3000 м
Горизонтальная скорость	до 40 км/ч	до 60 км/ч
Вес	3700 г	4200 г
Взлетный вес	8200 г	5200 г
Вес полезной нагрузки	4500 г	до 1000 г
Продолжительность полета	20—30 мин	30—40 г
Габаритные размеры: Д×Ш×В	460×450×36 мм	1720×1180×300 мм





Рис. 5. Общий вид БПЛА на базе гексакоптера DJI S900 (а) и самолетного типа (б).

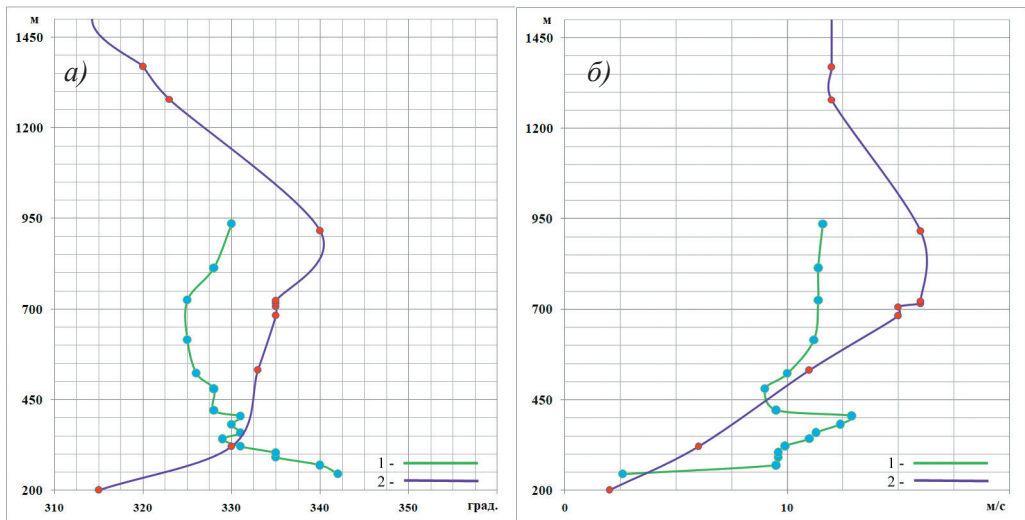


Рис. 6. Вертикальный профиль направления (а) и скорости (б) ветра за 12 ч UTC 13 декабря 2016 г.

1 — данные дрозонда, 2 — результаты радиозондирования.

Федурново (Владимирской области), с данными радиозондирования атмосферы для ст. Долгопрудный (ID 27612) за 12 ч UTC 13 декабря 2016 г.

Анализ рис. 6 показал, что данные о вертикальном профиле ветра, полученные в ходе экспериментальных исследований с помощью многоразового дрозонда, имеют достаточно хорошую сходимость с данными радиозондирования, что позволяет рассматривать возможность использования разработанной системы ветрового зондирования с применением дрозонда, сбрасываемого с беспилотного летательного аппарата для обеспечения оперативных работ по АВ на облака.

## Заключение

1. Полученные результаты численного моделирования активных воздействий на облака, проводимых с помощью генераторов AgI с борта БПЛА, позволили сформулировать требования к БПЛА с целью обеспечения возможности использования их в работах по АВ. Выполненная оценка эффективности АВ с борта БПЛА позволяет рассматривать их в качестве дополнительного средства доставки реагента в облако.

2. Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о том, что воздействия на переохлажденный туман с использованием пиротехнических генераторов AgI с борта БПЛА позволяют осуществить искусственное рассеяние тумана с высокой степенью результативности.

3. Показана возможность использования дрозонда, сбрасываемого с борта БПЛА, для получения данных о вертикальном профиле ветра в пограничном слое атмосферы в оперативном режиме и обеспечения оперативных работ по АВ на облака.

## Список используемых источников

1. *Бычков А.А., Сергеев Б.Н., Щужин Г.Г.* Оценка эффективности искусственного увеличения осадков с использованием легких летательных аппаратов // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 47. С. 68—78.
2. *Колосков Б.П.* и др. Численное моделирование переноса реагента при работах по активным воздействиям на облака // Метеорология и гидрология. 2012. № 12. С. 44—54.
3. *Корнеев В.П.* и др. Искусственное регулирование атмосферных осадков и рассеяние туманов. М.: Грин Принт, 2019. 300 с.
4. *Страшко А.В.* и др. Применение беспилотных летательных аппаратов для определения термодинамического состояния пограничного слоя атмосферы / В сб.: Труды II Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муромский институт (филиал) ФГБУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2018. С. 493—498.
5. *Сосникова Е.В.* и др. Исследование эффективности наноразмерных кристаллизующих реагентов AgI/SiO<sub>2</sub> / В сб.: Вопросы физики и облаков. Памяти Н.О. Плауде. Обнинск: изд-во ВНИИГМИ — МЦД, 2015. С. 323—330.
6. *Частухин А.В.* и др. Моделирования рассеяния переохлажденного тумана с использованием трехмерной численной модели FogSeeding // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 49. С. 47—57.
7. *Charry H.A., Lininder R.L.* The AWS handbook of ground-based cold fog dissipation using vented liquid propane // Report AWS-TR-75-255. 1975. V. 1. AIR Weather Service, United States AIR Force, Illinois. 55 p.