

УДК 551.509.617:629.735

А.А. Бычков, Б.Н. Сергеев*, Г.Г. Щукин***

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО
УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЕГКИХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

* Агентство атмосферных технологий; ** ВКА имени А.Ф. Можайского,
ggshchukin@mail.ru

A.A. Bychkov, B.N. Sergeev, G.G. Shchukin

**ESTIMATION OF PRECIPITATION EFFICIENCY
ENHANCEMENT WITH THE USE OF LIGHT VEHICLES**

В статье приводится анализ результатов численных экспериментов по активному воздействию самолетными методами на слоистообразные облака, полученных с помощью трехмерной численной модели «Seeding». Анализ результатов численных экспериментов показал, что легкомоторные самолеты могут эффективно использоваться в работах по увеличению осадков из слоистообразных облаков и имеют хорошие перспективы применения совместно с разработанной мобильной информационно-измерительной системой. Применение легкомоторных самолетов в работах по искусственному увеличению осадков позволит в значительной степени расширить сферу применения российских технологий активного воздействия на облака в интересах различных отраслей экономики.

Ключевые слова: теоретическая оценка, активные воздействия, слоистообразные облака, численная модель, легкие летательные аппараты.

The results of numerical experiments on weather modification by airplane methods of stratiform cloud seeding, obtained with the help of the three-dimensional numerical model «Seeding» are presented in the article. The analysis of the results of numerical experiments has shown that light aircraft can be effectively used in the work on weather modification of stratiform cloud seeding and have good prospects for being used together with the developed mobile information and measuring system. The use of light-engine aircraft in works on artificial precipitation enhancement will greatly expand the scope of application of Russian technologies of weather modification in the interests of various sectors of the economy.

Keywords: theoretical estimation, weather modification, stratiform cloud seeding, numerical model, light aircraft.

Введение

В России в работах по активному воздействию (АВ) на облака с целью искусственного увеличения осадков (ИУО) наибольшее распространение получил самолетный метод засева облаков [10], в котором носителями средств воздействия являются серийно выпускаемые самолеты.

Типы и летно-технические характеристики используемых самолетов, такие как высота, продолжительность и скорость полета, а также масса полезной нагрузки, оказали существенное влияние на технологию самолетного воздействия на облака различных форм. В настоящее время существуют два вида авиационной технологии воздействия: засев облаков сверху и засев под основанием облака. Для реализации каждой разновидности используются различные типы самолетов.

В табл. 1 приведены краткие характеристики самолетов, применяемых для активного воздействия на облака в нашей стране.

Таблица 1

Основные характеристики самолетов, используемых в работах по ИУО

Характеристика	Ил-18	Ан-12	Ан-30	Ан-26
Взлетная масса, кг	61 000	61 000	21 000	24 000
Крейсерская скорость, км/ч	617	590	430	430
Практический потолок, м	10 000	9 800	7 300	7 300
Максимальная дальность полета, км	4 270	4 560	2 550	2 340
Максимальная полезная нагрузка, кг	13 500	20 000	5 500	4 100

Как видно из табл. 1, используемые в настоящее время самолеты обладают высокими показателями по полезной нагрузке, продолжительности полета, которые позволяют эффективно использовать их для работ по ИУО на больших территориях. Однако применение таких самолетов в работах по АВ на облака влечет за собой не только большие финансовые затраты на топливо, но и требует сложной инфраструктуры для базирования и организации аэродромного обслуживания вблизи района проведения указанных мероприятий. Все эти факторы влияют на себестоимость и делают практически нецелесообразным их использование в оперативно-производственных работах для нужд различных отраслей экономики.

Наряду с этим в нашей стране в последние годы для гражданских задач все шире начинают применяться российские легкомоторные самолеты типа «Корвет», «Фермер», «Цикада», а также зарубежные самолеты, приобретаемые российскими авиакомпаниями, типа Cessna, Beechcraft King Air и т. п. Кроме того, в России все шире стали применяться беспилотные летательные аппараты (БПЛА) различных типов. Это становится возможным благодаря улучшению их летно-технических характеристик, увеличению их грузоподъемности, что делает все более актуальным одно из направлений развития авиационных технологий АВ: создание технологии воздействия на облака с помощью беспилотных летательных аппаратов [2].

Прогресс в разработках легкомоторной и беспилотной авиации, а также возрастающая в последнее время потребность различных отраслей экономики (таких как сельское хозяйство, водное хозяйство, авиалесоохрана) в проведении работ по АВ на облака с целью искусственного увеличения осадков, требуют разработки инновационных технологий использования этих технических средств.

Разработанные российскими специалистами методики применения самолетных технологий АВ на облака подразумевают привлечение в качестве источника метеорологической информации информационно-измерительной системы (ИИС). Данные, получаемые с помощью ИИС, необходимы для принятия решения о возможности проведения работ, выработки схем воздействия или их корректировок в процессе выполнения, оперативного контроля эффекта воздействия, а также количественной оценки его результатов [11].

Следует отметить, что существующая ИИС предполагает использование стационарных метеорологических радиолокаторов (МРЛ) и неспособна обеспечить

проведение работ по искусственному увеличению осадков для нужд сельского хозяйства в тех регионах России, где нет сети МРЛ [4]. В связи с этим при исследовании возможности применения легкомоторных самолетов и БПЛА в работах по увеличению осадков актуальным становится решение двух основных задач.

Первая задача — это создание мобильной информационно-измерительной системы, способной к оперативному развертыванию в районе проведения работ в местах, где отсутствует возможность получения радиолокационной информации с помощью автоматизированных радиолокационных комплексов, входящих в радиолокационную сеть Росгидромета, а также имеющей соответствующую мощность для продолжительной работы вдали от стационарных источников электроэнергии. Такая ИИС создана и используется в Агентстве атмосферных технологий на базе мобильного метеорологического радиолокатора ММРЛ «КОНТУР — МЕТЕО-01» [1, 4].

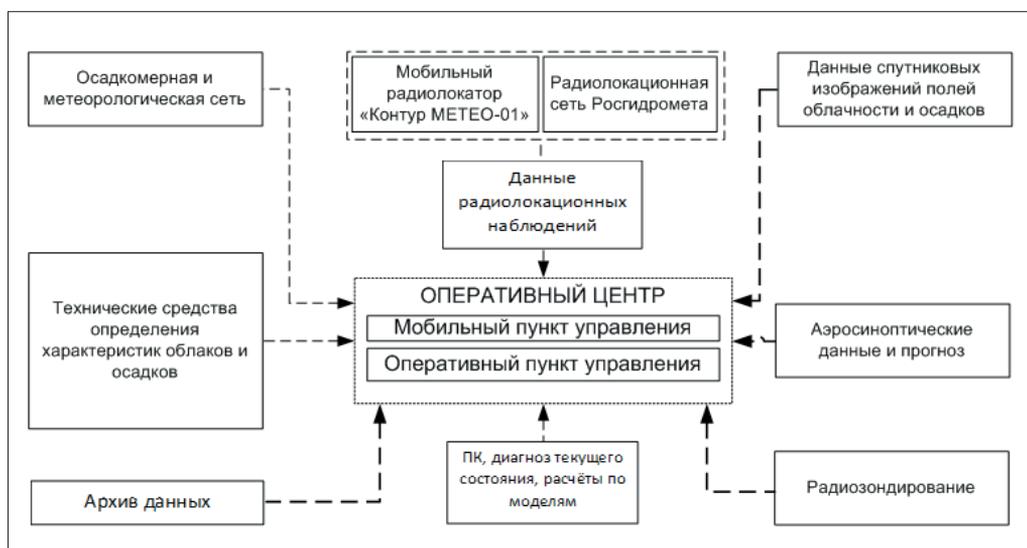


Рис. 1. Схема элементов мобильной информационно-измерительной системы

На рис. 1 представлена схема элементов разработанной мобильной информационно-измерительной системы и обеспечиваемых ими информационных потоков. Данная ИИС входит в состав мобильного пункта управления работами по АВ (МПУ АВ) на облака [5]. МПУ АВ позволяет не только управлять работами по АВ на облака, но и снабжать такие работы информацией о вертикальном профиле ветра в районе проведения работ, получаемой с помощью БПЛА [3], а также использовать в своем составе современные дистанционные средства [6, 7].

Второй важной задачей для совершенствования используемой в настоящее время самолетной технологии является исследование эффективности применения легких летательных аппаратов, в том числе и беспилотных, при проведении работ по ИУО.

Оценка эффективности применения легких летательных аппаратов в работах по АВ на слоистообразные облака методами численного моделирования

Одним из основных инструментов, позволяющих произвести оценку эффективности различных средств воздействия, является численное моделирование процесса воздействий. Преимущество такого моделирования — это возможность определения на этапе планирования работ степени влияния на эффективность таких факторов, как выбор метода воздействия, выбор типа применяемых технических средств воздействия, а также выбор режима функционирования выбранных технических средств с учетом конкретных синоптико-климатических и географических условий, характерных для данного района.

Для численного моделирования слоистообразных облаков и выпадающих из них осадков при естественном развитии и при проведении воздействия на них, в том числе и самолетными средствами, в Агентстве атмосферных технологий была разработана трехмерная численная модель «Seeding» [8, 9]. Данная модель является дальнейшим развитием разработанной в Агентстве трехмерной численной модели «SeedDisp», позволяющей рассчитывать перенос частиц реагента в пограничном слое и свободной атмосфере при работе различных средств воздействия и реагентов. Данная численная модель подробно описана в работе [9].

Помимо переноса частиц реагента в модели «Seeding» рассчитывается эволюция полей влажности, облачной водности, концентрации ледяных кристаллов, облачной ледности, водности дождя и ледности снега. Расчет переноса и эволюции этих субстанций выполняется с помощью комбинирования лагранжева и эйлерова подходов. Для состояния облака, соответствующего моменту времени сразу после диспергирования реагента, перенос искусственных частиц рассчитывается по лагранжевой схеме. Как только размер засеянных объемов становится сопоставимым с размером шага пространственной сетки, концентрация или масса частиц пересчитываются на сетку, и происходит переход к эйлеровой схеме.

Численное моделирование воздействий на слоистообразную облачность производилось для синоптических условий, наблюдавшихся в Московском регионе 5 мая 2014 г. В качестве исходной информации были использованы наземные данные о суточном ходе температуры, влажности воздуха, направлении и скорости ветра, а также данные радиозондирования атмосферы, полученные станцией в г. Долгопрудный (ID 27612).

В результате радиолокационных наблюдений, выполненных с помощью ММРЛ «КОНТУР — МЕТЕО-01», были получены данные о вертикальном профиле радиолокационной отражаемости, горизонтальном и вертикальном сечении облачности (рис. 2). Анализ данных показал, что развитие облачности происходило до высоты 5000 м, а выпадающие из облака осадки исключали возможность определения нижней границы облачности по данным радиолокационных наблюдений. Данное обстоятельство исключало возможность проведения численного моделирования воздействия на уровне нижней границы облачности для оценки влияния высоты внесения реагента на эффективность выполнения работ по АВ с помощью легкого летательного аппарата.

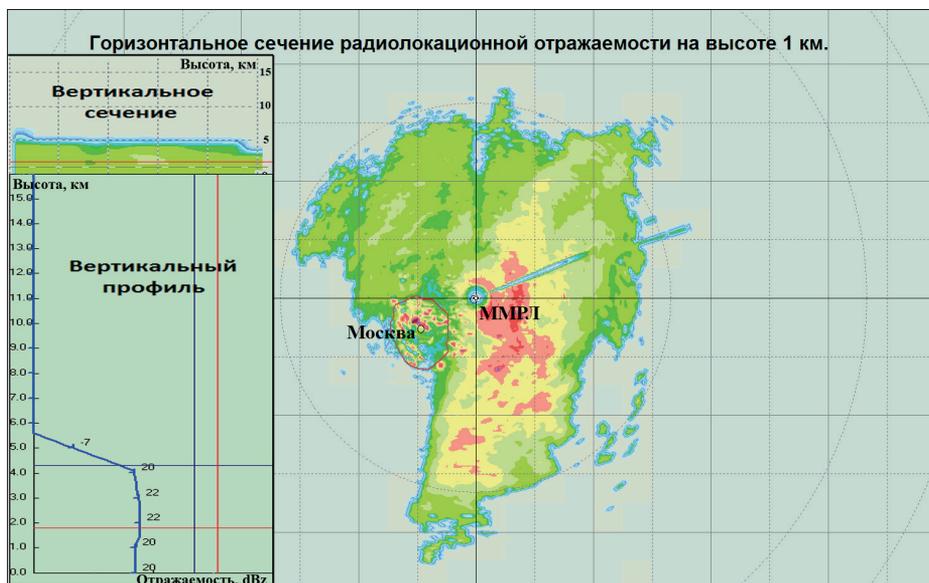


Рис. 2. Цифровая карта с отображением горизонтального (на высоте $H = 1$ км) и вертикального сечений и вертикального профиля радиолокационной отражаемости слоистообразной облачности в 03:18 05 мая 2014 г.

С помощью модели «Seeding» были проведены численные эксперименты по оценке эффективности воздействия на слоистообразную облачность с использованием легкого летательного аппарата и применяемых в настоящее время в работах по ИУО самолетов типа Ан-26 (Ан-30). В ходе выполнения данных экспериментов моделировались воздействия пиропатронами ПВ-26 с самолета Ан-26, а также пиротехническими генераторами САГ-26 с легкого самолета типа ТВС-2МС. При этом воздействия с помощью пиропатронов ПВ-26 осуществлялись сериями по 4 пиропатрона с интервалом 60 с, а воздействия с помощью пиротехнических генераторов САГ-26 производилось непрерывно, по два генератора на протяжении всего полета самолета.

За время проведения воздействий оба самолета совершили пролет четырех линий по 14 км, при этом были соблюдены условия эквивалентного расхода реагента. Основные характеристики использованных средств воздействия приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики пиротехнических генераторов САГ-26 и пиропатронов ПВ-26

Характеристика	САГ-26	ПВ-26
Масса пиросостава, г	92	34
Время горения, с	230	45
Содержание AgI, %	8	8
Выход льдообразующих ядер с изделия: - при температуре -10 °С - при температуре -6 °С	не менее 10^{15} не менее $2 \cdot 10^{14}$	не менее $4 \cdot 10^{14}$ не менее $2 \cdot 10^{14}$

Сравнение результатов численного моделирования осуществлялось по изменению основных микрофизических параметров облаков (водность, концентрация кристаллов на частицах реагента и т. д.), интенсивности осадков.

На рис. 3 приведены результаты расчетов концентрации кристаллов на частицах реагента в вертикальном сечении через 1 ч после начала воздействия с помощью пиропатронов ПВ-26 и генераторов САГ-26. Вертикальное сечение было выбрано вдоль направления ветрового переноса облачности. Из рисунка видно, что при проведении воздействий пиропатронами ПВ-26 и генераторами САГ-26 наблюдаются определенные различия в вертикальном распределении образовавшихся в слоистообразном облаке полей кристаллов на частицах реагента. Так, при воздействии генераторами САГ-26 образование ледяных кристаллов на частицах реагента происходит в основном на уровне полета самолета. В случае воздействия пиропатронами ПВ-26, образование ледяных кристаллов происходит не только на уровне полета самолета, но и в 1,5–2-километровом слое ниже.

Кроме того, при проведении воздействий существуют различия, выраженные не только вертикальным распределением полей кристаллов на частицах реагента,

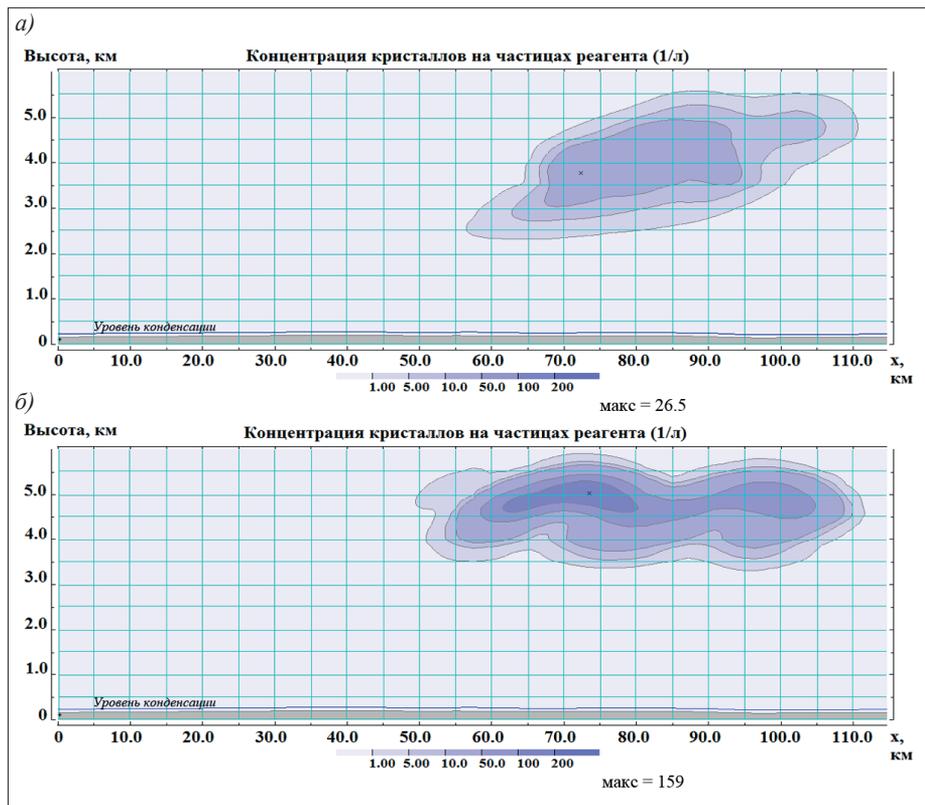


Рис. 3. Концентрация кристаллов на частицах реагента в вертикальных сечениях через 1 ч после начала воздействия на уровне верхней границы облачности (5100 м):
 а — пиропатронами ПВ-26; б — генераторами САГ-26

но и значениями концентрации кристаллов на частицах реагента. Данные различия можно объяснить разными скоростями полета самолетов. Так, при проведении воздействий генераторами САГ-26 с использованием легкого летательного аппарата, обладающего меньшей скоростью ($V = 120$ км/ч), значения концентраций кристаллов на частицах реагента, образовавшихся в облаке, выше ($\max = 159$ л/л), чем при воздействии пиропатронами ПВ-26 с использованием самолета, обладающего более высокой скоростью ($V = 435$ км/ч; $\max = 27$ л/л). Выявленные различия в образовании и распространении полей кристаллов на частицах реагента в облаке выражаются в отличиях воздействия на слой водности и являются определяющими эффективностью воздействия при проведении работ.

На рис. 4 приведены результаты расчетов водности (г/м^3) в вертикальных сечениях при естественном развитии слоистообразной облачности, а также через 1 ч после начала воздействия пиропатронами ПВ-26 и самолетными генераторами САГ-26 на уровне верхней границы облачности (5100 м).

Из рис. 4 видно, что протяженность проработки зон водности при воздействии генераторами САГ-26 практически в два раза больше, чем в случае воздействия пиропатронами ПВ-26, что может быть объяснено различными скоростями полета самолетов при проведении воздействий. Столь значительные уменьшения значений в слое водности, полученные в результате воздействий на уровне верхней границы облака с помощью пиропатронов ПВ-26 и пиротехнических генераторов САГ-26 по сравнению с естественным развитием облака, позволяют ожидать искусственного увеличения осадков.

С целью оценки эффективности воздействий на слоистообразную облачность пиропатронами ПВ-26 с помощью самолета Ан-26 и пиротехническими генераторами САГ-26 с использованием легкого летательного аппарата типа Ан-2 (ТВС–2МС) были проанализированы результаты численного моделирования интенсивности и количества осадков, полученные как при естественном развитии облачности, так и при проведении воздействий.

Из рис. 5, на котором приведен временной ход изменения интенсивности осадков, полученных в ходе выполненных воздействий, видно, что при воздействии с помощью пиропатронов ПВ-26 и генераторов САГ-26 проявление эффекта искусственного увеличения осадков начинается через 40–50 мин после начала воздействий и наблюдается в течение 1–1,5 ч, после чего интенсивности осадков возвращаются к уровню естественных осадков.

На рис. 6 представлен график изменения значений суммы осадков при проведении воздействий по сравнению с естественным количеством осадков.

Из рисунка видно, что максимальные значения изменения суммы осадков при воздействии пиротехническими генераторами САГ-26 достигали 18 %, а увеличение суммы осадков при воздействии пиропатронами ПВ-26 достигало 7 %. Различия в эффективности выполненных воздействий объясняются тем, что толщина слоя водности, воздействие на который приводит к эффекту искусственного увеличения осадков, ограничивается километровым слоем (см. рис. 3) и составляет лишь 50 % от слоя, прорабатываемого пиропатронами ПВ-26.

Таким образом, можно сделать вывод, что эффективность воздействий на наблюдавшуюся 5 мая 2014 г. слоистообразную облачность пиротехническими

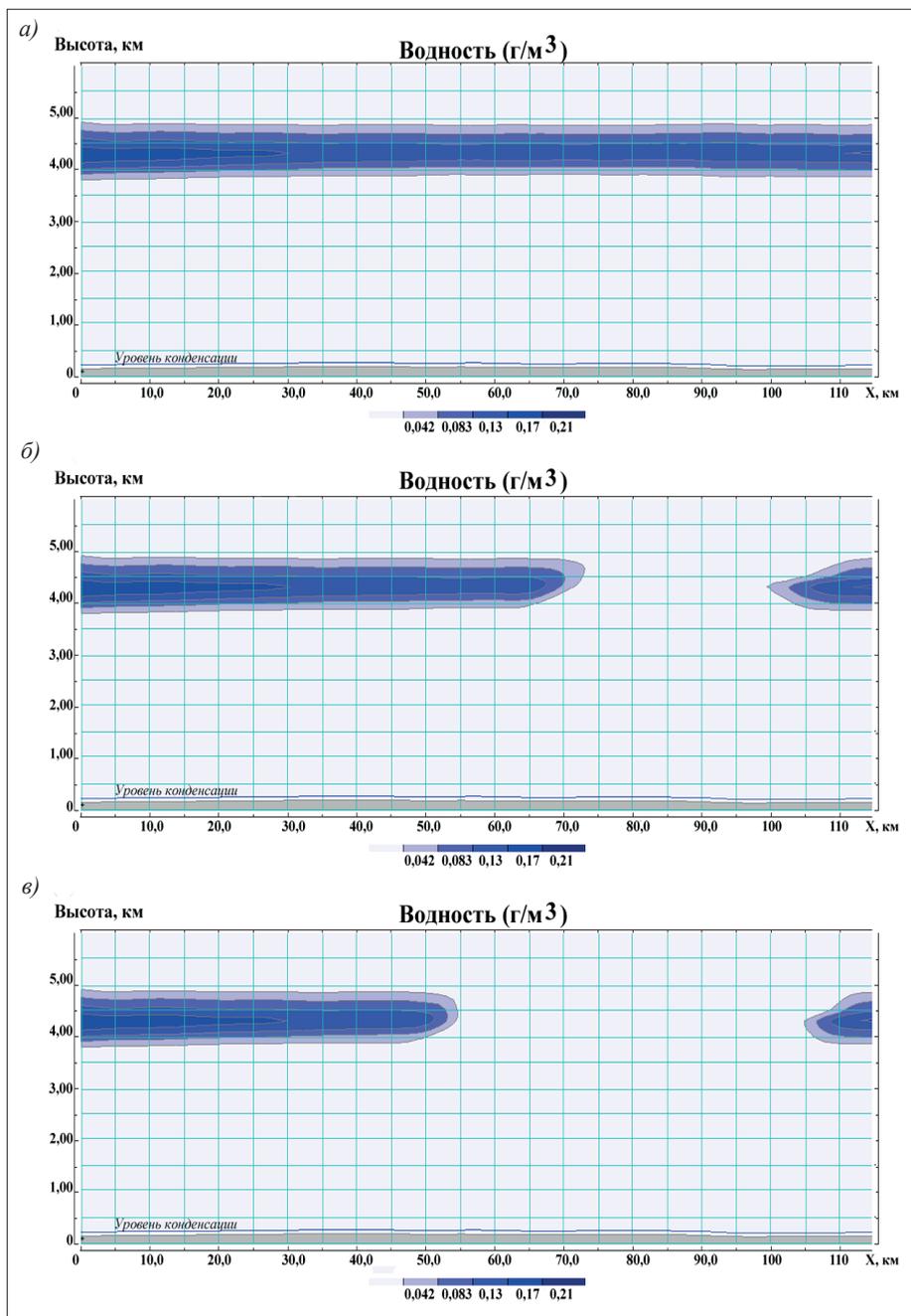


Рис. 4. Водность (г/м^3) в вертикальных сечениях через 1 час: *а* — при естественном развитии слоистообразной облачности; *б* — после начала воздействия пиропатронами ПВ-26; *в* — после начала воздействия генераторами САГ-26

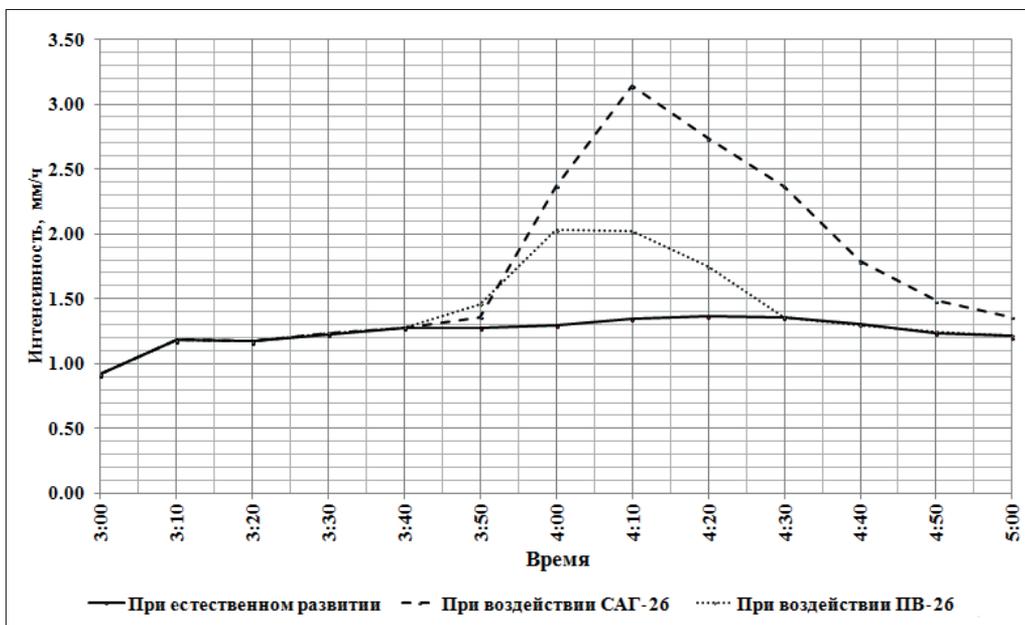


Рис. 5. Изменение интенсивности осадков (мм/ч) при воздействии ПВ-26, САГ-26 и при естественном развитии

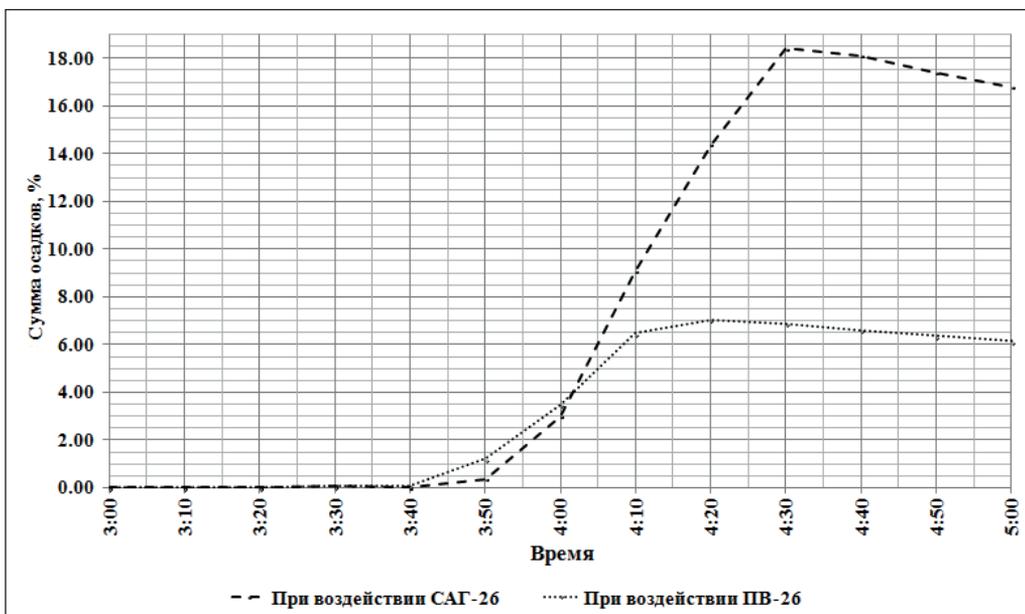


Рис. 6. Изменение суммы осадков (%) при проведении воздействий по сравнению с естественным слоем осадков

генераторами САГ-26 с использованием легкого летательного аппарата по верхней границе облачности не уступает эффективности воздействия пиропатронами ПВ-26, производимого с самолета Ан-26.

Выводы

1. Развитие работ по ИУО для нужд сельского хозяйства сдерживается отсутствием в России недорогих экономичных самолетов, способных выполнять работы по АВ на облака с грунтовых аэродромов, а также отсутствием во многих сельскохозяйственных регионах необходимых для работ по АВ информационно-измерительных средств.

2. Результаты численных расчетов показали, что эффективность использования легких летательных аппаратов, в том числе и БПЛА, сравнима с эффективностью используемых тяжелых самолетов и существенно зависит от скорости летательного аппарата. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность привлечения к работам по АВ легких летательных аппаратов, обладающих скоростями полета от 120 до 150 км/ч и способных выполнять полет на высотах до 8000 м.

3. Созданная на базе ММРЛ «КОНТУР – МЕТЕО-01» мобильная информационно-измерительная система позволяет проводить работы по ИУО как в регионах, имеющих метеорологическое радиолокационное обеспечение, так и в тех регионах, где таковое отсутствует.

4. Необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования, направленные на разработку комплексов самолетных средств АВ для обслуживания легких летательных аппаратов, позволяющих в значительной степени расширить сферу применения самолетных технологий АВ, а также разработать методику применения легких летательных аппаратов, в том числе и БПЛА, в работах по ИУО, что позволит проводить такие работы в местах, где ранее это было невозможно.

Литература

1. Бычков А.А., Колосков Б.П. Малогабаритный радиолокатор «КОНТУР – МЕТЕО-01» как средство получения метеорологической информации // Тр. III Всерос. научн. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». 2014. Т. 2. — С. 34–39.
2. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на облака и туманы / А.А. Бычков, В.П. Корнеев, Б.П. Колосков и др. // Док. Всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвящ. 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР. Ч. 2. — Нальчик, 2015. — С. 58–66.
3. Использование данных о вертикальном профиле ветра в работах по активному воздействию на облака наземными аэрозольными генераторами / А.А. Бычков, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев и др. // Мат. III Всерос. научн. конф. «Экология и космос» им. академика К.Я. Кондратьева, посвящ. году экологии в Российской Федерации. — СПб.: ВКА им. Можайского, 2017. — С. 214–220.
4. Использование мобильного метеорологического радиолокатора «КОНТУР – МЕТЕО-01» в работах по АВ на облака / А.А. Бычков, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев и др. // Изв. вузов, Северо-Кавказский регион. 2014. № 1. — С. 62–65.
5. Бычков А.А., Петрунин А.М., Частухин А.В. Мобильная система активных воздействий с целью искусственного увеличения осадков // Тр. ВМА им. А.Ф. Можайского «Проблемы военно-прикл. геофизики и контроля состояния природной среды». 2016. Вып. 653. — С. 67–70.

6. Горелик А.Г., Коломиец С.Ф., Шукин Г.Г. Информационные возможности ветровых профайлеров при зондировании атмосферы // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 18. — С. 70–89.
7. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты / И.А. Готюр, В.Ю. Жуков, Ю.В. Кулешов и др. // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 21. — С. 66–75.
8. Клейменова А. В. Оптимизация процесса искусственного увеличения атмосферных осадков на основе разработки технологии планирования: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.30. — Нальчик, 2015. — 124 с.
9. Численное моделирование переноса реагента при работах по активным воздействиям на облака / Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, А.В. Клейменова // Метеорология и гидрология. 2012. № 12. — С. 44–54.
10. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 341 с.
11. Методические указания. Проведение работ по искусственному увеличению осадков из слоисто-образных облаков. РД 52.11.646-2003. — СПб.: Гидрометеоздат, 2003. — 39 с.