

УДК 551.509.616

МЕТОДИКА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ ВОЛНИСТООБРАЗНЫХ ОБЛАКОВ С ЦЕЛЮ ВЫЗЫВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОСАДКОВ

А.П. Доронин, Н.А. Козлова, В.М. Петроченко, Г.Г. Щукин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, doronin52@mail.ru

Представлена методика модифицирования переохлажденных волнистообразных (слоистых, слоисто-кучевых) облаков с целью вызывания искусственных осадков, включающая в себя схему засева и расчет параметров мероприятия по воздействию (рубеж засева от предполагаемого района выпадения осадков, длина и число линий засева, расход химических реагентов и количество искусственно вызванных осадков как за один день, так и за месяц, сезон, полугодие). Показано, что методика применима к любым районам России, где наблюдаются переохлажденные волнистообразные облака, и может быть использована при подготовке и проведении работ по вызыванию осадков из переохлажденных волнистообразных облаков.

Ключевые слова: методика, переохлажденные волнистообразные облака, модифицирование, химические реагенты, искусственные осадки.

METHOD OF MODIFYING OF SUPERCOOLED WAVE-LIKE CLOUDS WITH THE AIM OF INDUCING ARTIFICIAL PRECIPITATION

A.P. Doronin, N.A. Kozlova, V.M. Petrochenko, G.G. Shchukin

A.F. Mozhaysky Military-Space Academy

A technique for modifying supercooled wave-like (stratus, stratocumulus) clouds to induce artificial precipitation is presented, which includes a seeding scheme and calculation of parameters of events on effects (boundary of seeding from the intended precipitation area, the length and number of seeding lines, the consumption of chemical reagents and quantity of artificially-induced precipitation both in one day, and in a month, season, half year). It is shown that this technique is applicable to any regions of Russia where supercooled wave-like clouds are observed, and can be used in the preparation and conduct of works on causing precipitation from supercooled wave-like clouds.

Keywords: technique, supercooled wave-like clouds, modification, chemical reagents, artificial precipitation.

Введение

Анализ работ по проблеме воздействия на атмосферные процессы и явления позволяет сделать вывод о том, что наиболее разработанными в теоретическом плане и внедренными на практике являются методы и средства воздействия на облака и туманы [1, 8, 12].

Различие в методах воздействия на облака различных форм обусловило необходимость разделения их по температуре на теплые (наблюдаются при положительных значениях температуры воздуха) и переохлажденные (наблюдаются при отрицательных значениях температуры воздуха). В настоящее время проведен ряд натурных экспериментов по воздействию на облака с целью создания благоприятных погодных условий над Москвой, Санкт-Петербургом, Казанью и другими городами [4, 7].

Тем не менее существует необходимость в разработке конкретных методик воздействия на теплые и переохлажденные облака естественного и искусственного происхождения для решения широкого круга задач в определенных физико-географических районах.

Целью настоящей работы является разработка методики модифицирования переохлажденных волнистообразных облаков с целью вызывания искусственных осадков.

Выбор в качестве объекта модифицирования переохлажденных волнистообразных облаков обусловлен следующими причинами:

- высокая повторяемость таких облаков [1], и в частности переохлажденных [2, 3], в различных районах России;

- существенное влияние волнистообразных облаков на деятельность различных хозяйственных отраслей страны ввиду их высокой повторяемости, больших размеров (тысячи километров) и значительной длительности существования (от нескольких часов до десятков часов) над пунктом [1, 8, 12];

- возможность решать широкий круг хозяйственных и экологических задач [1, 6, 8—10] (см. рис. 1), не причиняя при этом серьезного экологического ущерба [5, 11];

- значительный экономический эффект [1, 8, 12].

Ниже представлены результаты исследований по разработке вышеназванной методики.

Методика вызывания искусственных осадков из переохлажденных волнистообразных облаков

Если решение на проведение воздействия принято, то орган управления приступает к подготовке и ставит задачу системе метеорологического обеспечения по вызыванию искусственных осадков из волнистообразных (слоистых (St), слоисто-кучевых (Sc)) переохлажденных облаков. При этом требования к результатам такого воздействия заключаются в следующем:

- вызвать осадки в заданном районе размером $L_d \times L_{ш}$ к директивному времени t_d ;

- осуществить их выпадение в течение интервала времени τ_d .

Методика предполагает два этапа.

Первый этап включает в себя проведение совокупности следующих мероприятий.

1. Анализ данных о состоянии (прогнозе) погоды в предполагаемом районе проведения операции по вызыванию осадков из ПВО и осуществление разведки погоды

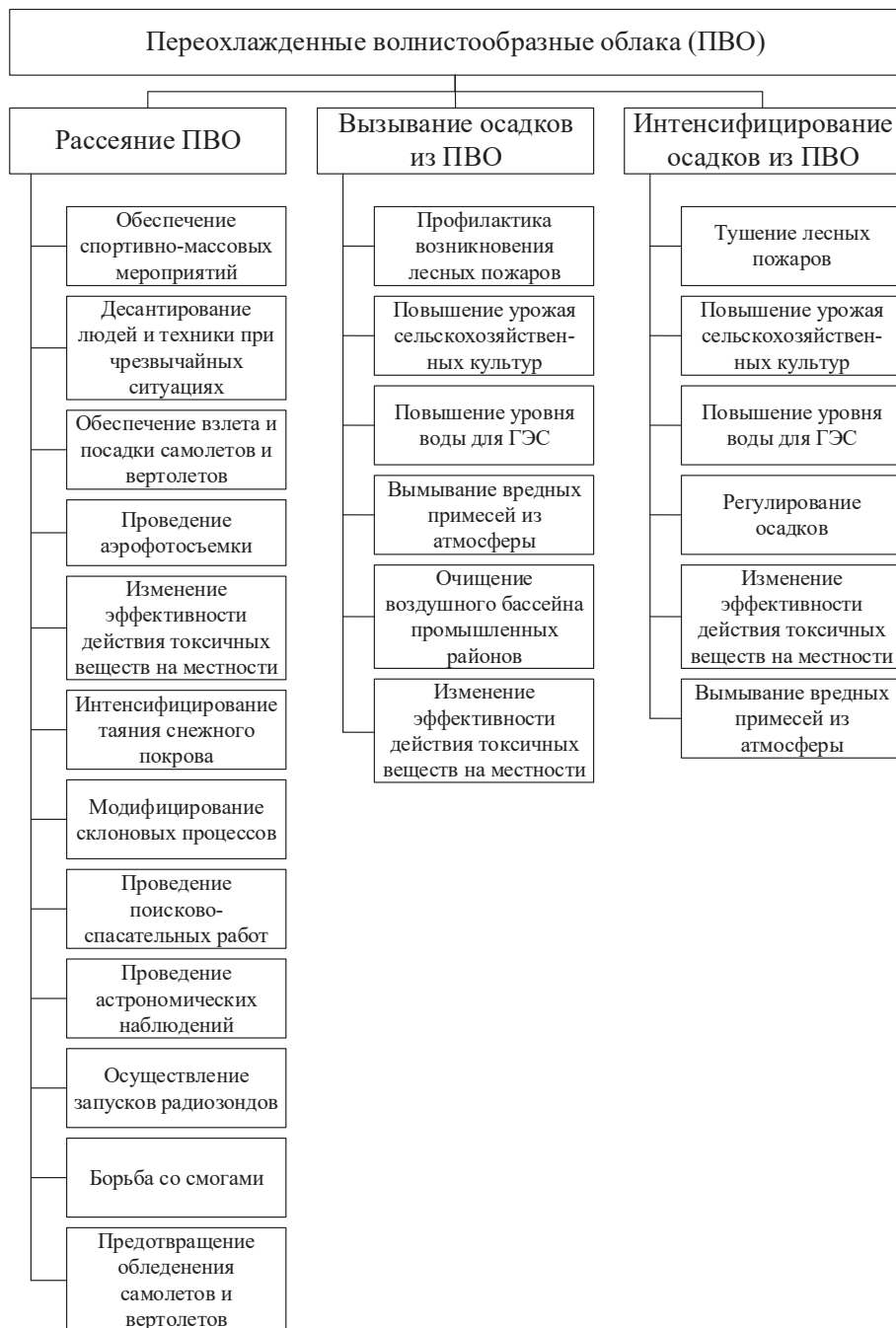


Рис. 1. Перечень хозяйственных и экологических задач, решаемых при воздействии на переохлажденные волнистообразные облака (ПВО).

при использовании дистанционных средств зондирования атмосферы (метеорологических радиолокационных локаторов, самолетов-разведчиков погоды, специально оборудованных самолетов-лабораторий, а также и космических средств) с целью получения данных о следующих характеристиках облаков:

- форме облаков, их мощности и горизонтальной протяженности;
- расслоенности облаков;
- скорости и направлении перемещения облачного покрова на уровне засева химическими реагентами;
- высоте нижней и верхней границ облаков;
- температуре на границах облачного слоя;
- влажности облаков.

2. По результатам анализа данных о характеристиках облаков принимается решение о необходимости проведения воздействия на облака в определенном районе с целью решения конкретной прикладной задачи, например очищения воздушного бассейна крупного города.

3. С учетом решаемой прикладной задачи выбирается схема засева облаков. В частности, для вызывания искусственных осадков над определенным районом с целью решения задачи, указанной в п. 2, может быть использована схема воздействия на облака, приведенная на рис. 2.

При определении схемы засева будем исходить из следующих соображений. Засев осуществляется по верхней границе облачного слоя; при этом положение линии засева определяется с учетом скорости движения облаков на уровне засева и ширины зоны кристаллизации, образующейся в результате применения химических реагентов. В связи с этим схема засева облаков представляет собой «восьмерку».

4. На основании данных о средней температуре облачного слоя $t_{обл.}$ определяется расстояние между линиями засева $L_{ш.л.з.}$. При выбранной схеме засева

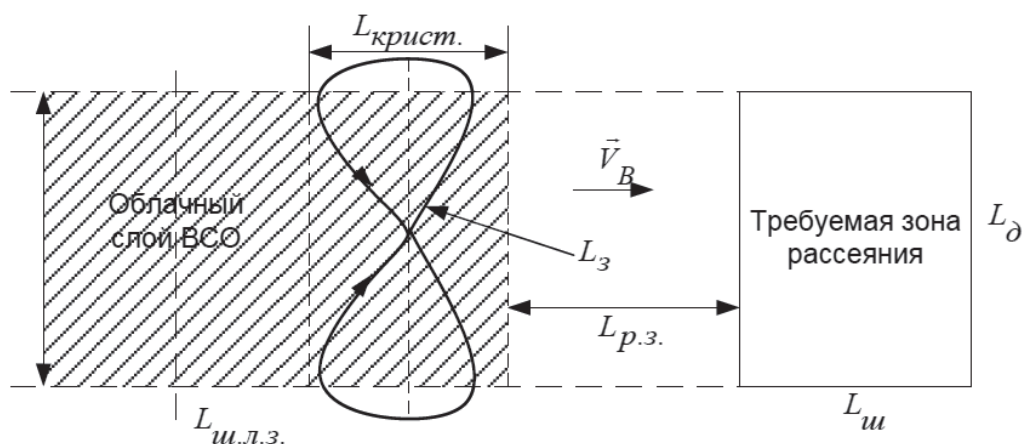


Рис. 2. Схема засева ПВО с целью вызывания осадков над определенным районом.

переохлажденных облаков St — Sc ширина зоны кристаллизации $L_{\text{крст.}}$ будет равна расстоянию между линиями засева.

При температуре воздуха ниже $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ расстояние $L_{\text{ш.л.з.}}$ выбирается равным 2—4 км (в среднем 3 км), а при температуре от -3 до $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ расстояние $L_{\text{ш.л.з.}}$ уменьшается до 1—1,5 км [9, 10].

5. На основании данных о характеристиках облаков (в частности, о средней температуре облачного слоя) принимается решение о выборе химических реагентов. При температуре в пределах от $-1,0$ до $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в качестве химического реагента целесообразно использование жидкого пропана, жидкого азота; от $-4,0$ до $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — твердой углекислоты, йодистого серебра и др.; при $-11,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже — веществ природного происхождения (фторфлогопит, коалинит, монтмориллонит и др.).

6. На основании данных о размерах зоны искусственных осадков делается вывод о требующемся для засева волнистообразных облаков числе самолетов. Так, если длина зоны осадков $L_{\text{з.ос.}}$ совпадает с длиной линии засева $L_{\text{з.}}$, то для проведения операции потребуется всего один самолет. Ширина зоны осадков, как правило, равна длине 40-минутного переноса облачного слоя [9, 10]. Так, если скорость переноса ПВО составляет 30 км/ч, то ширина зоны осадков будет составлять 20 км.

7. На основании выполненных в п. 1—6 операций (действий) осуществляются проведение организационных мероприятий, связанных с подготовкой обслуживающего персонала и техники, а также постановка задачи.

На втором этапе в соответствии с выбранной схемой засева облаков проводится расчет характеристик мероприятий по модифицированию облаков с целью вызывания искусственных осадков над конкретным районом.

Рассмотрим схему засева одним самолетом, представленную на рис. 2. В качестве решаемой задачи рассмотрим задачу по вызыванию искусственных осадков над крупным городом с целью очистить воздушный бассейн от загрязняющих примесей. Расчет характеристик включает в себя проведение следующих мероприятий.

1. Расчет рубежа засева от предполагаемого района вызывания осадков:

$$L_{\text{р.з.}} = v_0 t_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{р.з.}}$ — рубеж засева от зоны раскрытия цели (км); v_0 — скорость перемещения облаков (км/ч); $t_{\text{ср}}$ — время срабатывания реагента (ч) (в соответствии с эксплуатационными данными составляет в среднем 20 мин, или 1/3 ч) [9, 10].

2. Определение длины линии засева $L_{\text{з.}}$ одним самолетом. Длина линии засева выбирается с таким расчетом, чтобы при заданной ширине зоны кристаллизации обеспечивалась полная кристаллизация натекающих облаков. Это достигается в том случае, если за время нахождения самолета на линии воздействия облачный покров сместился на расстояние, равное ширине зоны кристаллизации от одной линии. Определение линии засева производится по следующей формуле:

$$L_{\text{з.}} = v_{\text{с}} t, \quad (2)$$

где v_c — скорость полета самолета (км/ч), t — время нахождения самолета на линии засева L_3 .

3. Определение длины линии засева с учетом времени на разворот самолета (t_p):

$$L_3 = L - v_c t_p. \quad (3)$$

4. Расчет времени нахождения самолета на линии засева по данным о ширине зоны кристаллизации $\Delta L_{\text{крист.}}$ (км) и скорости облачного слоя v_0 (км/ч):

$$t = \frac{\Delta L_{\text{крист.}}}{v_0}. \quad (4)$$

Для практических расчетов ширина зоны кристаллизации принята равной 3 км [9, 10].

5. Определение общего числа линий засева:

$$N = \frac{L_{\text{ос}}}{\Delta L_{\text{крист.}}}, \quad (5)$$

где N — общее число линий засева, $L_{\text{ос}}$ — ширина облачной системы (км).

6. Расчет общего количества жидкокапельной влаги в слое кристаллизации в предположении равномерного распределения кристаллов по всему объему:

$$Q = q_{\text{ср}} \Delta H \Delta L_{\text{крист.}} L_3, \quad (6)$$

где Q — количество жидкокапельной влаги в засеянном объеме облака (г), $q_{\text{ср}}$ — средняя водность (г/м³), ΔH — средняя мощность пригодных к засеву облаков $St - Sc$ (м).

7. Расчет количества вымываемой из засеянного объема влаги:

$$Q_1 = QK, \quad (7)$$

где Q_1 — количество вымываемой из облачного слоя влаги (г), K — коэффициент реализации водозапасов, который принимается равным 0,6—0,8 [9, 10].

8. Расчет ширины зоны искусственных осадков вдоль направления переноса:

$$L_{\text{ш}} = v_0 \cdot \tau_{\text{ос}}, \quad (8)$$

где $L_{\text{ш}}$ — ширина зоны искусственных осадков (км), $\tau_{\text{ос}}$ — длительность выпадения искусственных осадков (ч). Согласно [9, 10], $\tau_{\text{ос}}$ составляет 40 мин, или 2/3 ч.

9. Определение площади зоны искусственных осадков:

$$S = L_{\text{ш}} L_3, \quad (9)$$

где S — площадь зоны искусственных осадков (км²).

10. Расчет количества искусственных осадков (при их равномерном распределении на площади S) от одной линии засева:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{S}. \quad (10)$$

11. Расчет общего количества искусственных осадков при воздействии на всю облачную систему:

$$Q_3 = Q_2 N, \quad (11)$$

или

$$Q_3 = \frac{K q_{\text{ср}} \Delta H L_{\text{ос}}}{v_0 \tau_{\text{ос}}}. \quad (12)$$

При

$$L_{\text{ос}} = v_0 \tau, \quad (13)$$

где τ — время существования облаков над пунктом (ч) и $\tau_{\text{ос}} = 2/3$ ч [9, 10], выражение (12) примет вид

$$Q_{\text{ис.ос.}} = \frac{3}{2} K q_{\text{ср}} \Delta H \tau \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где $Q_{\text{ис.ос.}}$ — количество искусственных осадков (мм) при воздействии на слоистые, слоисто-кучевые облака в течение одного дня.

12. Оценка требуемого расхода реагента. Количество требуемого реагента определяют исходя из характеристик волнистообразных облаков, стадии их эволюции, необходимого времени воздействия:

$$Q_p = Q_{\text{р/км}} N_{\text{л.з.}} L_3, \quad (15)$$

где $Q_{\text{р/км}}$ — расход реагента на километр полета самолета по линии засева (г/км или кг/км).

Расчет количества использованного реагента произведен для твердой углекислоты (CO_2). Выполненные к настоящему времени работы по воздействию на облака позволили определить нормы расхода этого реагента исходя из значений мощности облачного слоя ΔH (табл. 1) [9, 10]:

Таблица 1

Нормы расхода твердой углекислоты (q_{CO_2}) при засеве переохлажденных волнистообразных облаков										
ΔH , м	200	250	300	350	400	450	500	550	600	> 650
q_{CO_2} , г/км	100	150	200	250	350	450	550	700	800	1000

В случае использования в качестве химического реагента йодистого серебра его расход составит от 30—40 до 100 г/км (в зависимости от типа используемого самолетного аэрозольного генератора или пиропатрона-генератора) [8].

Для длительного периода воздействия (месяц, сезон, полугодие) расчет количества искусственных осадков проводится по формуле

$$Q'_{\text{ис.ос.}} = Q_{\text{ис.ос.}} n a, \quad (16)$$

где $Q'_{\text{ис.ос.}}$ — количество искусственных осадков (мм) при воздействии на слоистые, слоисто-кучевые облака в течение месяца, сезона, полугодия; n — число дней с волнистообразными облаками за месяц, сезон, полугодие; a — коэффициент пригодности к вызыванию осадков ПВО по месяцам, сезонам, полугодиям.

При расчетах могут быть использованы средние значения параметров волнистообразных облаков, пригодных к вызыванию искусственных осадков.

В качестве примера в табл. 2 приведены значения коэффициента a по сезонам и полугодиям для районов Архангельска, Санкт-Петербурга и Москвы.

Таблица 2

Коэффициент пригодности
переохлажденных волнистообразных облаков к вызыванию осадков

Пункт	Сезон				Полугодие	
	Зима	Весна	Лето	Осень	холодное	теплое
Архангельск	0,56	0,31	0,01	0,23	0,44	0,07
Санкт-Петербург	0,45	0,23	0,003	0,22	0,44	0,03
Москва	0,41	0,19	—	0,14	0,37	0,06

Приведенные в табл. 2 значения коэффициента пригодности ПВО к вызыванию осадков получены в результате обработки материалов самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м над указанными пунктами. Всего обработано 13 025 подъемов самолетов-зондировщиков. Пригодными к вызыванию искусственных осадков считались волнистообразные облака (слоистые и слоисто-кучевые) капельного или смешанного строения мощностью 250—300 м с высотой нижней границы не более 1000 м и с температурой на верхней границе не выше -4°C [9]. Значения коэффициента a , приведенные в табл. 2, относятся к случаям применения в качестве химического реагента твердой углекислоты.

Настоящая методика может быть использована в оперативной практике для оценки количества искусственных осадков из переохлажденных волнистообразных (слоистых, слоисто-кучевых) облаков в любом физико-географическом районе Российской Федерации.

Выводы

1. Разработана методика модифицирования переохлажденных волнистообразных (слоистых, слоисто-кучевых) облаков с целью вызывания искусственных осадков, включающая в себя способ засева облаков и методику расчета параметров таких мероприятий (рубеж линии засева, длина и число линий засева, количество искусственных осадков, расход реагента). Показано, что методика может быть применима и к другим районам России.

2. Установлено, что для расчета количества искусственных осадков из волнистообразных облаков в течение месяца, сезона, полугодия необходимы данные о коэффициенте пригодности этих облаков к воздействию в конкретных районах страны. Для получения значений этого коэффициента требуется провести обработку материалов самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м с привлечением критерия пригодности волнистообразных облаков к воздействию с целью вызывания из них искусственных осадков.

3. Разработанная методика вызывания осадков из переохлажденных волнистообразных облаков может оказаться полезной и необходимой при оценке общего эффекта регулирования осадков.

Список литературы

1. *Доронин А.П.* Воздействия на атмосферные процессы и явления. СПб: изд-во ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014. 292 с.
2. *Доронин А.П.* Исследование повторяемости переохлажденной внутримассовой слоистообразной облачности над рядом районов России применительно к проблеме ее модифицирования // В сб.: Материалы XX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции, 13—15 мая 2008 г. Казань, 2008. С. 154—156.
3. *Доронин А.П.* Повторяемость переохлажденных внутримассовых слоистообразных облаков над различными районами России // В сб.: Материалы XVIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Ч. II. Казань, 2005. С. 160—162.
4. *Дядюченко В.Н., Корнеев В.П., Стасенко В.Н.* Опыт работы по метеозащите крупных городов / В сб.: Материалы юбилейной конференции «Состояние и перспективы развития технологий и технических средств воздействия на гидрометеорологические процессы. Чебоксары, 1999. С. 48—49.
5. *Ким Н.С., Корнеев В.П., Частухин А.В., Щукин Г.Г.* Экологические аспекты технологий активных воздействий на облака // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 46. С. 91—99.
6. *Козлов В.Н., Доронин А.П., Петроченко В.М.* Экологическая опасность лесных пожаров и методы ее предотвращения // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 48. С. 234—248.
7. *Колосков Б.П., Корнеев В.П., Петров В.В., Берюляев Г.П., Данелян Б.Г., Щукин Г.Г.* Оценка результатов работ по метеозащите крупных городов // Метеорология и гидрология. 1995. № 2. С. 66—73.
8. *Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г.* Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб: изд-во РГГМУ, 2012. 341 с.
9. *Половина И.П.* Воздействия на внутримассовые облака слоистых форм. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 214 с.
10. *Половина И.П.* Рассеяние переохлажденных слоистообразных облаков и туманов. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 215 с.
11. *Environment Impact of artificial ice nucleating agents* / Ed. Donald A. Klein. Colorado State University. Dowden. Hutchinson. Ross. Inc. Stroudsbard, Pennsylvania, 1978. 256 p.
12. *Weather and climate modification.* New-York, 1974. 654 p.