

курс

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

# Самолеты, используемые в работах по активным воздействиям на атмосферные



Самолет воздействия АН-12

Основные технические характеристики:

Взлетная масса - 61 т

Масса полезной нагрузки - 18т

Крейсерская скорость - 600 км/ч

Макс. продолжительность полета - 8 час

Практический потолок - до 9000 м

# Самолет воздействия Ан-30



Кроме того:

Самолет воздействия Ан-72, ИЛ-18

# Тема 6

## *Реагенты*

# Воздействие на фазовый состав облака

- Основная группа методов АВ на облака различных форм связана с воздействием на фазовую неустойчивость облачной среды,
- Неустойчивость - определяется долговременным существованием в осадкообразующей облачности обширных зон с переохлажденной жидкокапельной влагой (вплоть до темп. -  $35^{\circ}$  -  $40^{\circ}\text{C}$ ).
- При введении в такую зону искусственных зародышевых ледяных частиц начинается процесс "перегонки" водяного пара с переохлажденных капель на эти частицы в силу того что  $E_v < E_l$
- Поэтому кристаллики льда дорастают до размеров частиц осадков значительно быстрее, чем капли.

- В работах по АВ применяются Два способа искусственного увеличения количества дополнительных центров кристаллизации:
- Введение в зоны с переохлажденной жидкокапельной влагой хладореагентов.
- Для этих целей используются гранулированная твердая углекислота (сухой лед  $\text{CO}_2$ ), гранулы которой имеют температуру  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  и жидкий азот ( $\text{N}_2$ ) температура кипения  $-178\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Для введения в облака гранулированной углекислоты применяются самолетные углекислотные комплексы.
- Воздействие жидким азотом производится с помощью самолетных азотных генераторов мелкодисперсных частиц льда ГМЧЛ-А.

- Вторым способом искусственной кристаллизации переохлажденных капель является введение в облако аэрозолей иодида серебра  $\text{AgI}$ ,
- частицы  $\text{AgI}$  не влияя непосредственно на температуру воздуха выполняют функцию искусственных ядер кристаллизации - играют роль подложки для роста ледяных частиц, поскольку их кристаллическая структура изоморфна льду.
- Аэрозоли иодида серебра  $\text{AgI}$  вводятся в облако путем отстрела пиропатронов ПВ-26 при полете самолета вблизи верхней границы облаков.
- Каждый пиропатрон ПВ-26 содержит 40 г пиротехнического состава с йодистым серебром, льдообразующая активность которого составляет  $5 \times 10^{12}$  ядер на 1 г состава (при температуре  $-10^\circ\text{C}$ ). Длина трассы активного дымления составляет 1 км.

# Подавление развития мощных конвективных облаков

- Используемые для этой цели методы базируются на том, что в период развития конвективной облачности тепловое или динамическое возмущение атмосферы в зоне неустойчивости вызывает изменение интенсивности или направления вертикального потока, инициированного возмущающим импульсом.



- Для искусственного инициирования внутриоблачных нисходящих движений (струй) применяется сброс в вершину облака самораскрывающихся упаковок с грубодисперсными порошками (чаще всего - цемента).
- В этом случае в верхней части облака создается квазиупорядоченный нисходящий воздушный поток, благодаря которому нарушается структура упорядоченных воздушных движений в зоне вершины облака.
- В поле горизонтального ветра происходит перестройка и начинается втекание сухого околооблачного воздуха внутрь  $C_u$ ,  $C_b$ .
- Поступающий внутрь вершины относительно сухой воздух охлаждается из-за испарения в нем облачных частиц, что способствует его опусканию внутрь облака на сотни метров, что даже может сформировать здесь мощный нисходящий поток.
- В преобладающем большинстве случаев такое воздействие приводит к частичному (а чаще - полному) разрушению облаков.
- При этом, интенсивность процесса рассеяния  $C_u$ - $C_b$  в результате такого воздействия практически одинакова как в теплых так и в переохлажденных облаках.

# *Гигроскопические реагенты*

Ширина спектра облачных капель определяет степень коллоидальной устойчивости облака. Чем уже диапазон размеров облачных капель, тем меньше вероятность их взаимной коагуляции, а значит, тем медленнее изменяется спектр капель со временем. Наличие в воздухе небольшого числа гигантских (  $\mu\text{м}$ ) и сверхгигантских (  $\mu\text{м}$ ) облачных ядер конденсации приводит к образованию крупных капель. Если концентрация гигантских и сверхгигантских ОЯК мала, то при решении ряда задач активных воздействий возникает необходимость создания крупных капель путем внесения в облако частиц, выполняющих роль этих ядер. Такие частицы называют гигроскопическими реагентами.

В качестве реагентов обычно используют хорошо растворимые соли различных кислот, например:

хлористый натрий

кристаллогидраты хлористого кальция и другие

минеральные удобрения (карбамид и аммиачная селитра)

Природа действия гигроскопических реагентов,

распыленных в облаке, ничем не отличается от природы действия естественных ядер конденсации.

Также как ядра конденсации, солевые частички реагента адсорбируют водяной пар, создавая вокруг себя водяную пленку, и растворяются в ней.

В зависимости от влажности окружающего воздуха они растут, как капли солевого раствора. Если размеры солевых частиц больше размеров естественных ОЯК, то для неограниченного роста таких частиц требуется меньшее пересыщение.

- Принцип воздействия на облака и туманы заключается в переконденсации-перегонке водяного пара с большого числа облачных капелек на меньшее число более крупных капель, образующихся на частицах реагента. Далее вступает в действие механизм коагуляции.
- Введение в облако гигроскопических реагентов осуществляется либо распылением сухой соли воздушной струей, либо пульверизацией насыщенного раствора реагента. К сожалению, такими методами не удастся получить частицы (капли) заданного размера. Спектр частиц оказывается очень широким.

- В последние годы большую популярность получил «огненный» метод диспергирования реагента. Реагент-соль смешивается с пиротехническим составом. При сгорании этого состава частички соли попадают в воздух в хорошо измельченном состоянии.
- Существуют гигроскопические реагенты, которые при взаимодействии с водой вступают с ней в экзотермическую реакцию (с выделением значительной тепловой энергии).
- В качестве примера можно привести такие широко известные вещества как
  - известь (негашеная)  $CaO$ ,
  - карбид кальция  $CaC_2$ ,
  - гидриды – химические соединения водорода с другими элементами (гидрид лития  $LiH$ , алюмогидриды металлов  $M(AlH_4)_n$  и др.).

# Льдообразующие реагенты

- Льдообразующими реагентами (ЛОР) называют вещества, при внесении которых в облако в сильно измельченном (диспергированном) виде создаются искусственные льдообразующие ядра. Первым использованным более полувека назад реагентом было йодистое серебро. Выбор его не был случайным. Дело в том, что параметры кристаллической решетки одной из модификаций йодистого серебра ( $\beta$ ) практически совпадают с параметрами кристаллической решетки льда  $Ih$ . В кристаллохимии широко используется способ выращивания искусственных кристаллов на изоморфной подложке (такой процесс называется эпитаксией). Изоморфность льду  $Ih$  послужила основанием для использования йодистого серебра в качестве стимулятора образования ледяных кристаллов. За минувшие годы были испытаны в качестве ЛОР сотни, если не тысячи, различных веществ. Среди них достаточно эффективными оказались соли окислы металлов органические вещества (кристаллогидрат флороглюцина), (метальдегид), (1,5 – диокси нафталин), специально синтезированные металлоорганические вещества, например, (ацетилацетонат меди).

- Качество реагента характеризуется двумя величинами – льдообразующей активностью (ЛОАР) и температурным порогом льдообразования ( $t_{\text{п}}$ ). Льдообразующей активностью называют количество активных ледяных частиц, формирующихся в облаке при внесении в него единичной массы реагента. ЛОАР зависит от температуры. Самая высокая температура, при которой реагент проявляет свои льдообразующие свойства, называется пороговой (порог температуры). При этой температуре льдообразующая активность становится настолько малой, что ее трудно зарегистрировать. (Практически ЛОАР при этом составляет  $10^8 \dots 10^9 \text{ г}^{-1}$ ). Реагент считается тем эффективнее, чем выше его пороговая температура (ближе к  $t_{\text{п}}$ ) и чем больше ЛОАР при заданной температуре.

Вещества, используемые в качестве реагента, должны удовлетворять следующим основным требованиям.

- 1. *Нерастворимость*. При растворении в воде разрушается поверхность вещества, тем самым исключается возможность упорядоченной ориентации молекул воды, необходимой для образования кристаллической структуры. В то же время для проявления льдообразующих свойств вещество должно обладать гидрофильностью. Требования нерастворимости и гидрофильности плохо совместимы. На практике они удовлетворяются добавлением к реагенту гидрофильных присадок.



- 2. *Размер.* Важной характеристикой является степень дисперсности реагента.
- Чем меньше размеры частиц реагента, тем большее число их может быть получено из единичной массы.
- Однако независимо от механизма нуклеации при заданных условиях жизнеспособными могут быть только ледяные зародыши с размерами больше критического.
- критический радиус жизнеспособных зародышей зависит от температуры (при механизмах конденсационного, иммерсионного и контактного замерзания) и от пересыщения при замерзании осаждения, *которое, в конечном счете, также является функцией температуры.*
- Очевидно, что формирование жизнеспособного ледяного зародыша на ЛОЯ или частичке ЛОР энергетически выгодно только в том случае, когда размер ядра оказывается больше размера зародыша. Поэтому очень мелкие частички становятся неэффективными в качестве ЛОЯ.

- Исследования показали, что образцы реагента с очень однородной поверхностью (хорошо отполированной) проявляют меньшую льдообразующую способность, чем те, на поверхности которых содержатся многочисленные микроскопические трещины, сколы, выступы, каверны и т. д.
- Более того, на поверхности реагентов отмечаются, так называемые активные места, на которых происходит образование ледяных зародышей при повторных опытах.
- Окруженные участками гидрофобной поверхности активные места адсорбируют молекулы воды, которые с понижением температуры встраиваются в ледяную решетку.
- Размеры активных мест соизмеримы с размерами жизнеспособных зародышей, а значит размеры ЛОЯ должны быть существенно больше их.

- 3. *Подобие*. Важным условием эффективности реагента является подобие его кристаллической решетки или поверхностных свойств соответствующим характеристикам льда. Это способствует уменьшению энергии, необходимой для образования жизнеспособных ледяных зародышей. Различают три вида подобия.
- – *Изоморфность* (Тождество кристаллических структур). В табл. 1.9.1 приведены сведения о параметрах кристаллических решеток для некоторых веществ.
- Видно, что кристаллические решетки йодистого серебра и льда являются практически одинаковыми. Этим и объясняют высокий температурный порог . Кристаллические решетки других веществ в большей или меньшей мере отличаются от решетки льда *Ih*. Образование ледяных зародышей связано с необходимостью подстройки (преодоления деформации) кристаллической решетки льда (или подложки). Такая подстройка возможна лишь при сравнительно небольших отличиях строения кристаллов.

# Параметры кристаллической решетки некоторых веществ

| Вещество                   | Сингония*       | Постоянные решетки, нм |       |       | Температурный порог, °С |
|----------------------------|-----------------|------------------------|-------|-------|-------------------------|
|                            |                 | $a_0$                  | $b_0$ | $c_0$ |                         |
| Лед–Ih                     | гексагональная  | 0,452                  |       | 0,736 |                         |
| AgI                        | гексагональная  | 0,459                  |       | 0,751 | –3...–6                 |
| $PbI_2$                    | тригональная    | 0,454                  |       | 0,686 | –4...–7                 |
| $CuS$                      | гексагональная  | 0,380                  |       | 1,64  | –4...–8                 |
| $Cu_2O$                    | кубическая      | 0,425                  |       |       | –4...–6                 |
| $C_6H_3(OH)_3 \cdot 2H_2O$ | орторомбическая | 0,673                  | 1,358 | 0,809 | –2...–5                 |
| $(CH_3CHO)_4$              | тетрагональная  | 1,040                  |       | 0,411 | –1...–2                 |

Сингония – классификационное подразделение кристаллов по признаку симметрии элементарной ячейки кристалла.

- Если отличаются не только параметры решетки, но и вид сингонии, рост кристаллов не может быть эпитаксимальным.
- Для подстройки кристаллов в этом случае требуется дополнительная энергия.
- Например,  $Cu_2O$  отличается от льда  $Ih$  и сингонией, и размерами осей. Эпитаксимальный рост льда на подложке  $Cu_2O$  представляется маловероятным. Однако пороговая температура почти не отличается от для и  $PbI_2$ .
- Еще большее отличие проявляется между решетками льда и органических веществ. Тем не менее, пороговые температуры для них оказываются даже выше, чем для . Это означает, что эффективность льдообразования определяется не только изоморфностью.

- – *Подобие водородных связей.* Взаимодействие между молекулами  $H_2O$  во льду осуществляется с помощью водородных связей  $O...H$ . Наличие атомов кислорода или гидроксильных групп на поверхности вещества способствует формированию водородных связей с молекулами пара или воды. Аналогичную природу льдообразования проявляют и биогенные ЛОЯ.
- – *Подобие электростатической структуры поверхности,* расположение зарядов полярных молекул на поверхности вещества подобно их расположению на поверхности льда.

## *Цепочка превращений.*

| Состояния                                  | Процессы                                            |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <i>1 – реагент</i>                         |                                                     |
|                                            | 1 – нагрев и возгонка реагента                      |
| <i>2 – газ реагента</i>                    |                                                     |
|                                            | 2 – перемешивание с окружающим воздухом, охлаждение |
| <i>3 – пересыщенный газ реагента</i>       |                                                     |
|                                            | 3 – образование микроскопических частиц реагента    |
| <i>4 – аэрозоль реагента</i>               |                                                     |
|                                            | 4 – нуклеация льда                                  |
| <i>5 – жизнеспособные ледяные зародыши</i> |                                                     |
|                                            | 5 – рост зародышей                                  |
| <i>6 – АЛЧ</i>                             |                                                     |

- С физической точки зрения мы имеем дело с фазовыми превращениями собственно реагента и гетерогенной нуклеацией льда на его поверхности.
  - Сильный нагрев реагента приводит к его быстрому испарению, то есть к переходу в газообразное состояние (возгонка).
  - По мере удаления от источника нагрева газ реагента, перемешиваясь с окружающим воздухом, охлаждается и становится пересыщенным.
  - Создаются условия для гомогенной  
(газ → капли → кристаллы реагента)  
или гетерогенной (газ → кристаллы) нуклеации реагента.
- Образование жизнеспособных ледяных зародышей на частицах реагента осуществляется одной из четырех мод нуклеации льда, описанных выше. Состояния 1...4 и процессы 1...3 отражают механизм диспергирования реагента.



# диспергирование реагента

```
graph TD; A[диспергирование реагента] --- B[Степень диспергированность и (измельченности) реагента]; B --- C[Скорость нагрева]; B --- D[следующее за нагревом охлаждение]; B --- E[наличием и размерами инородных частиц];
```

Степень  
диспергированность  
и  
(измельченности)  
реагента

Скорость  
нагрева

следующее  
за нагревом  
охлаждение

наличием  
и размерами  
инородных частиц

- На практике способы диспергирования тесно связаны со средствами доставки реагента в облака.
- В лабораторных условиях диспергирование реагента можно осуществить путем внешнего нагрева.
- В практике воздействий реализация такого приема затруднительна.

- Широкое распространение получили методы диспергирования, связанные с сжиганием реагента в пиротехнических составах.
- Эти методы используются при доставке реагента в облако с помощью специальных ракет, которые несут так называемые шашки активного дыма (ШАД).
- Шашка представляет собой пиротехническую смесь с примесью реагента.
- На заданном участке траектории ШАД воспламеняется.
- В облаке образуется «след» аэрозоля реагента.
- Аналогичный процесс происходит при обстреле облаков пиропатронами с летательных аппаратов.

- При обстреле облаков с поверхности земли с помощью артиллерийских орудий реагент закладывается в снаряд, начиненный взрывчатым веществом (ВВ).
- При взрыве снаряда температура ВВ резко повышается, что приводит к испарению реагента.
- Эффективным способом получения мелкодисперсных частиц йодистого серебра является растворение его в ацетоне.
- Сжигание ацетона в специальной камере приводит к образованию газа. Перемешиваясь с воздухом этот газ становится пересыщенным, что способствует образованию аэрозольных частиц реагента.
- Этот способ имеет ряд технологических недостатков, в частности связанных с пожароопасностью.

# Тема 7

## **Способы воздействия**

- Воздействия на облако:

вызывание – предотвращение осадков

- Воздействия на туман:

вызывание – предотвращение

- Воздействия на лавины:

вызывание – предотвращение

# Доставка реагента в облака:

- Возгонка с земли в пламени реагента красного фосфора;
  - подъем смеси в облако на шарах-пилотах;
- Сброс реагента с самолета;
  - Противогорадовые комплексы;
- Артиллерийские снаряды;







**ЭЛИЯ**



**АЛАЗАНЬ**



**НЕБО**



**КРИСТАЛЛ**





# Противоградовое изделие «АЛАН»

Предназначено для  
воздействия на  
градовые облака с  
целью защиты  
сельскохозяйственных  
культур от градобитий, а  
также может  
использоваться в  
работах по обеспечению  
увеличения осадков.





# Воздействия на туман





Искусственно создаваемые туманы используются в качестве «одеяла», которое прикрывает ценные морозонеустойчивые сельскохозяйственные культуры и препятствует их радиационному выхолаживанию

Туманы ухудшают видимость при использовании всех видов транспорта, особенно в районах аэродромов и космодромов







**При посадке  
самолета пилот  
наиболее четко  
должен видеть  
начало ВПП.  
Поэтому если ВПП  
покрыта  
однородной по  
плотности пеленой  
тумана, то по мере  
приземления  
самолета световой  
путь в тумане  
увеличивается.**

## *Различают следующие виды туманов:*

- *Радиационный* - возникают за счет радиационного выхолаживания после захода солнца
- *Адвективный* - образуются при переходе более теплого влажного воздуха на более холодную подстилающую поверхность при скорости ветра 5-7 м/с
- *Адвективно-радиационные* - формируются за счет адвекции и радиационного выхолаживания
- *Морозные* - возникают при температуре ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  при антициклоническом типе погоды
- *Туманы испарения* - образуются при переходе более холодного воздуха на более теплую поверхность открытой воды зимой
- *Фронтальные туманы* - образуются при прохождении атмосферных фронтов, чаще теплых.

## **Существуют несколько способов рассеяния (просветления) туманов:**

1. тепловой
2. динамический
3. изменение поглощательных свойств тумана;
4. увеличение интенсивности конденсационных процессов;
5. акустический;
6. электрический;
7. оптических квантовых генераторов (ОКГ);
8. регулирования испарения;
9. пассивации ядер конденсации.



# ***Рассеяние туманов с помощью искусственных тепловых источников***

Для нагрева ВПП с целью рассеяния тумана применялась система ФИДО (Fog Investigation Dispersal Operations) – служба искусственного рассеяния тумана.

При расчете просветления тумана с помощью тепловых источников надо знать, во-первых, как распространяется тепло в тумане; во-вторых, к какому изменению структуры тумана, а тем самым и видимости в нем это приведет.



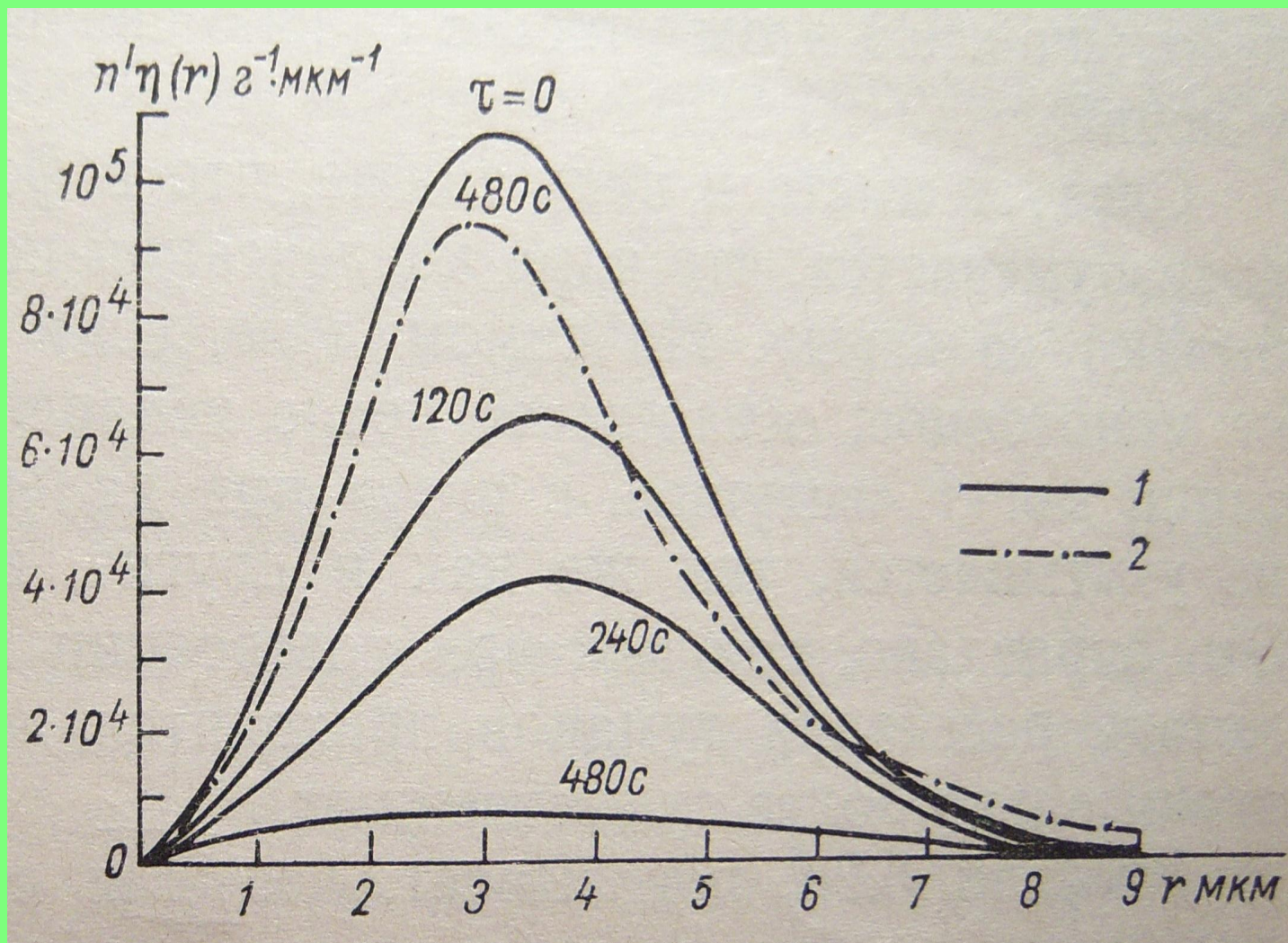


Рис - Распределение капель по размерам при нагревании в различные моменты времени

# *Динамический метод рассеяния тумана*

Динамический метод основан на динамическом и тепловом эффектах поля скоростей. Основными факторами рассеяния тумана при этом являются испарение капель в опускающемся и в результате этого нагреваемомся воздухе, а также опускание более прозрачного тумана, поступающего на смену высасываемому.





## ***Изменение поглощательных свойств туманов с целью их рассеяния***

Изменяя поглощательные свойства облаков и туманов, облучаемых естественными или искусственными источниками оптического диапазона, можно изменить тем самым их тепловой баланс. «Подкрашивание» облаков и туманов выполняется путем введения в них мелко диспергированных частиц примесей с большим коэффициентом поглощения. Такие «преобразователи энергии» оказывают существенное влияние на облако или туман вследствие изменения скорости испарения капель или характера их роста, плавучести воздуха. Поглощающие радиацию частицы могут обеспечивать нагрев воздуха, достаточный для возбуждения конвекции.

## ***Рассеяние туманов с помощью реагентов, интенсифицирующих конденсационные процессы***

**Наиболее успешно этот метод используется при рассеянии переохлажденных туманов с помощью кристаллизующих реагентов. В результате засева тумана искусственно созданными ледяными кристаллами коллоидальная устойчивость тумана нарушается.**

**Если концентрация искусственно созданных кристалликов подобрана удачно, это приводит к тому, что туман становится оптически более прозрачным – видимость в нем улучшается.**

# ***Акустические методы просветления туманов***

Прохождение акустических сигналов через туман вызывает в нем следующий эффект. Частицы тумана увлекаются звуковой волной, при том при фиксированной частоте в тем большей мере, чем меньше их размер. В результате этого в полидисперсном тумане появляются дополнительные смещения частиц тумана относительно друг друга, что увеличивает вероятность их столкновения и последующей коагуляции.

Звуковая сирена, установленная на носу корабля и создающая акустическое поле, с перестраиваемой частотой принципиально в состоянии обеспечить просветление тумана впереди по курсу корабля.

При обеспечении взлета и посадки самолетов установка сирен на самолете исключена, прежде всего, из-за того, что самолет движется быстрее, чем успевает рассеиваться туман.



# ***Электрические методы просветления туманов***

Метод заключается в возможности просветления туманов с использованием электрических сил с помощью дискретно распределенных в тумане заряженных коллекторов, а также путем создания в тумане достаточно мощных электрических полей.

Просветление туманов с использованием электрических сил принципиально возможно, но при этом либо электрические поля, создаваемые для этой цели в тумане, должны быть достаточно мощными, либо капли тумана должны иметь большой заряд.

