



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Метеорологии, Климатологии И Охраны Атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему «Условия формирования слоистой структуры града»

Исполнитель Гаторе Айз Клэр Иналин

Руководитель Кандидат Физико-Математических Наук, кафедры
МКОА Доцент Кашлеева Лариса Владимировна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

подпись

кандидат географических наук, доцент
Абанников Виктор Николаевич

«14» 06 2019г.

Санкт-Петербург
2019

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

$R_{гр}$ — радиус градины, см

$q_{ад}$ — водность облака,

D — коэффициент диффузии молекул водяного пара в воздухе,

E — Коэффициент коагуляции,

L_k — Удельная теплота замерзания воды,

V_R — скорость градины,

$C_{ж}$ — Теплоёмкость жидкого ядра,

$T_{п}$ — Температура поверхности ледяного оболочки,

T — Температура воздуха,

λ_l — коэффициент теплопроводности воздуха,

Nu — Число Нуссельта,

Sh — Число Шервуда,

ρ_r - средняя плотность градины,

ρ_l - плотность льда кг / м³ ;

ρ_v - соответственно плотность воды,

$\rho_{возд}$ — плотность воздуха кг/м³;

$\lambda_v = 4.5 \cdot 10^3$,

T_i — температура воздуха в облаке, К

$L = 3,24051 \cdot 10^{10}$,

q_v - Водность в облаке кг/м³,

\dot{R} - скорость поступления воды к препятствию,

k_f - коэффициент формы препятствия,

λ_v - коэффициент теплопроводности воды,

L - теплота кристаллизации воды,

V - скорость потока относительно препятствия,

\bar{E} - среднеинтегральный коэффициент захвата препятствием аэрозольных частиц,

T_0 и T_1 - температура стабильной кристаллизации и аэрозольного потока,

a и b - размерные константы, характеризующие линейную скорость кристаллизации ,см.С⁻¹.

ЛСК -линейная скорость кристаллизации.

Введение	5
1. Условия формирования градоопасного облака	7
1.1. Градоопасное явление для деятельности человека.	7
1.2. Размер крупинок и градин	11
1.3. Градоопасное Облако.....	14
1.4. Служба по борьбе с градом.....	24
2. Микрофизические процессы для формирования града.....	27
2. 1. Слоистая структура градов.	27
2.2. Влажные и сухие режимы роста крупинок и града.	36
2.4. Образование слоистой структуры градины.	42
3. Анализ структуры градины при использовании равновесной толщины пленки.	46
3. 1. Расчёт равновесной толщины пленки.	46
3.2. Расчёт критической водности в облаке.....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	60

Введение

Град - это явление, которое всегда привлекало внимание. Внезапность буря града, его краткость, его насилие, его узко определенная траектория - все это поразительные черты. Разрушительная сила града рано привела к поиску методов защита града. Тщательное знание о проявлениях града кажется все более и более необходимым для истинной профилактики опасного явления. Изучение града является актуальное задачей.

Цель нашей работы является обсуждения обработки теории формирования слоистой структуры града, и зависимость толщина пленки от размера градин. Для этого мы разделили работа в частях.

В первом главе, мы проанализировали каких условия необходимо для формирования градоопасного облака.

Отметим, что град в середине шторма, или более точно при наличии града, достигающего земли является исключительным явлением, приводит к метеорологическому дисбалансу и требует, чтобы был выполнено ряд условий, собранных в одной точке. Градина является самым известным элементом. Его массивная структура отражает его особый характер роста. Она растет путем захвата и замораживания капель воды. Эти капли, хотя и при отрицательной температуре, составляют то, что специалисты называют «переохлажденным облаком». Вопросы все еще существуют о самом граде, в основном на ранних стадиях обучения. Что такое зародыш града: ледяной кристалл? а потом на каком льде родилось ядро? большая капля переохлажденной воды?

Для облака града, различные наблюдения в последние годы, впервые пришли к следующей выводам. Град рождается и растет в переохлажденной зоне кучево-дождевых облаков в форме струй: струй спуска. Эта труба кажется высокой, небольшого сечения, особенно наклоненной к большим высотам. Град растет, в то время как он управляется восходящими потоками.

Постепенное увеличение его веса замедляет его подъем, таким образом увеличивает продолжительность роста (пребывание в переохлажденной части облака), несмотря на увеличение скорости восходящих течений на высоте

В второй главе, мы рассмотрели какие есть микрофизические процессы для формирования и роста града. Град имеет прозрачные части и непрозрачные части. Непрозрачные части образуются из замороженных капель сразу после их захвата, в то время как прозрачные части создаются путем постепенного замерзания. Прогрессивное замораживание и мгновенное замораживание, кажется, зависят друг от друга; действительно, температура града быстро поднимается до 0 градусов, и вода будет замерзать более постепенно. Движения града в градовом облаке также объясняют его форму (формы вращения, вызванные вращательными движениями, град неровностей, вызванных сваркой меньших градов).

Рост града требует поддержания в переохлажденной зоне облака в течение определенного времени. Град диаметром 3 см потребует около двадцати минут пребывания в этом районе.

В последней главе, мы анализировали структуры градины с использованной равновесной толщиной пленки.

В этой работе мы постарались ответить на все вопросы о различных формах роста градины: от их формирования до образования различных слоев на их поверхности, а также проводим расчеты и анализ сравнивая все факторы, вовлеченные в это явление в целом. Здесь мы кратко укажем теорию образования града и как она контролировалась опытом.

1. Условия формирования градоопасного облака

1.1. Градоопасное явление для деятельности человека.

Град сформирован конкретно в кучево-дождевых облаках; которые являются облако сильного вертикального развития из-за неустойчивости воздуха, где сильные восходящие движения быстро поднимают на высоту очень влажный воздух, который конденсируется, а затем замерзает в результате быстрого охлаждения. Градины затем опускаются на периферию кучево-дождевых облаков и начинают таять, когда они возвращаются ниже высоты изотермы нулевой степени.

Град-ливни продолжаются ненадолго и влияет только на ограниченную территорию вдоль коридора в шторме. В пределах зоны выпадающего града диаметр града неравномерен, поскольку скорость подъема и плотность влаги в конвективном облаке варьируются от точки к точке. Град может повлиять на большую площадь и оставить десятки тонн льда на земле. Эти массы льда часто вызывают большой сюрприз наблюдателям, потому что град выпадает чаще всего летом и когда температура на земле высокая (обычно 30 ° C).

Происхождение Града

Гроза образуется в горячей, влажной воздушной массе, намного выше точки замерзания, и очень неустойчива. Воздух, поднятый таким образом, наконец станет насыщенным, потому что его температура уменьшается с высотой в соответствии с законом идеальных газов. Избыточная влажность сначала образует облако, а затем капли дождя. Град растет, когда капли дождя, содержащиеся в буре продолжают расти в сильном восходящем

потоке и заморозить. Чтобы замерзнуть, капли должны быть ниже точки замерзания и соответствовать замораживающему сердечнику.

Как только капля замерзает на верхних уровнях тропосферы (нижний слой атмосферы Земли), где температура ниже -10°C , она становится таким замерзающим ядром, которое может начать град. Эмбриона находит себя в окружении водяных паров и оставалась капля жидкости, то переохлаждение может существовать вплоть до температуры -39°C . Поскольку давление паров от насыщения лёд меньше, чем у воды при этих температурах, водяной пар, содержащийся в быстро поднимающемся воздухе, будет конденсироваться преимущественно на ледяных ядрах. Поэтому град будет расти быстрее, чем капли дождя во влажной атмосфере, подобной силе бури.

Кроме того, град эмбрионов «поглощает» водяной пар переохлажденными каплями в их окрестностях. Действительно, на поверхности капель всегда есть обмен водяным паром с окружающим воздухом, и град, кажется, привлекает к нему молекулы воды, потому что им легче конденсироваться, чем по подагре. Наконец, капли дождя, которые контактируют с градом, мгновенно замерзают на его поверхности.

Все это позволяет градинам быстро расти в облаках с высоким содержанием жидкости. Темпы роста особенно важно около -13°C . Этот процесс также происходит в очень сильном восходящем потоке, который приведет к тому, что градины очень высоки в атмосфере, до высоты более 15 км, со скоростью набора высоты более 40 км / ч.

Образование града не имеет никакого отношения к снегу. Последнее образуется в слоистых облаках с низким вертикальным движением, при температурах ниже нуля градусов Цельсия и в массе воздуха, содержащей относительно мало влаги, где мало переохлажденных капелек. В этих условиях кристаллы льда, которые образуются очень маленькие и растут медленно, чтобы дать хлопья.

Падение града.

Максимальный размер града в облаке не найден на земле. Действительно, как только он покидает облако, град начинает сублимировать, потому что воздух больше не насыщен. Когда он переходит в слой, где температура превышает точку замерзания, он также начинает плавиться и испаряться. То, что мы находим на земле, - это то, что не изменилось и зависит от высоты уровня замерзания.

Скорость падения града зависит от ускорения Земли ($9,81 \text{ м / с}$), которое привлекает его к земле, плавучесть Архимеда, который противостоит ему (незначительная сила), столкновение с другими градом и каплями, вертикальная составляющая ветра (восходящий ветер) и вязкость воздуха (в частности, коэффициент сопротивления). Когда баланс сил, ускорение останавливается, а град достигает конечной скорости. Это трудно определить, потому что теоретически все эти параметры известны только несовершенно и градины не являются идеальной сферой

Обратите внимание, что гигантские градины могут иметь конечную скорость до 45 м / с . Эти огромные конечные скорости предполагают существование восходящих потоков, имеющих сопоставимую скорость, позволяющих образовывать такие частицы. "

Повреждение

Град является разрушительным явлением для сельскохозяйственных культур и имущества. Кроме того, крупные градины опасны для людей и

животных. Сильно изъеденные деревья более уязвимы для определенных вредителей, особенно грибков.

Экстремальные

Самый большой град из когда-либо сообщавшихся в Соединенных Штатах: диаметр 20,3 см и 47,3 см в окружности.

Записи, утвержденные Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (НОАА):

В США, градина держит рекорд самого большого диаметра, 20,3 см (размер с дыней), и что более тяжелого, 879 г, упала до Вивиана в Южной Дакоте, то 23 июля 2010, Тем не менее, один с наибольшей окружностью упал в Авроре, Небраска, 22 июня 2003 г., это было 47,6 см, на 0,3 см больше, чем у Вивиана;

Мировой рекорд для тяжелого града составляет 1,02 кг. Он упал в Бангладеш в 14 апр. 1986, Девяносто два человека (92) были убиты во время шторма, а не обязательно по падению град

Град в области авиации

В редких случаях крупные градины серьезно повредили самолеты, пересекающие бушующую зону, поэтому самолеты должны избегать гроз даже с помощью радара на борту. Действительно, градины очень отражающие, если они видны непосредственно лучом радара, но, если они находятся за зоной сильного дождя, сигнал, возвращающийся из града, будет ослаблен последним. Тогда пилоту может показаться, что он направляется в более слабую зону дождей или даже в поляну, когда прошел сильный дождь.

1.2. Размер крупинок и градин

Обычно градины имеют диаметр в несколько сантиметров. Наблюдения показывают, что крупные градины могут иметь длину главной оси от 6 до 8 см. Градины с еще большими размерами были обнаружены Браунингом (1966) и Роосом (1972), который описал град, который весил 766 г и имел окружность 44 см, что эквивалентно радиусу сферы 7 см. Град, собираемый на земле, обычно представляет собой твердые частицы льда. В ранних исследованиях роста града это наблюдение привело к предположению, что градины всегда растут как частицы твердого льда. Тем не менее, в более поздних экспериментальных исследованиях, в которых рост града моделировался в аэродинамических трубах, Лист (1960) и Маклин (1961) обнаружили, что градины не всегда являются твердыми частицами, но, в зависимости от режима роста, они также могут быть «мягкими» частицами, которые состоят из смесей ледяной воды, называемых губчатым льдом. Такие смеси воды со льдом образуются, когда скрытая теплота, выделяющаяся во время роста, не достаточно эффективно обменивается между градом и его окружающей средой, чтобы позволить всей воде, собранной градом, замерзнуть.

Малый град

В возвышающемся кучевых облаках (облако ливней), с гораздо более низким тепловыми и более теплой верхней частью, могут дать очень малую небольшую (менее 5 мм) с помощью аналогичного процесса. Этот небольшой град иногда называют мокрым снегом.

Плотность крупинок и градин

Насыпная плотность частиц ледяного льда сильно варьируется в зависимости от плотности упаковки облачных капель, застывших на ледяном кристалле. Таблица 1 показывает, что объемная плотность частиц крупинки варьируется от 0.05 g cm^{-3} примерно до 0.89 g cm^{-3}

Observer	Size range (mm)	Density (g cm^{-3})
Locatelli and Hobbs (1974), Washington	0.5 - 3	0.05 - 0.45
Zikmunda and Vali (1972), Wyoming	0.5 - 1	0.45 - 0.7
Zikmunda and Vali (1972), Wyoming	1 - 2	0.25 - 0.45
Bashkirova and Pershina (1964a,b), U.S.S.R.	0.4 - 3	0.08 - 0.35
Braham (1963), Missouri	0.5 - 3	0.85 - 0.89
List (1958a, b), Switzerland	0.5 - 6	0.5 - 0.7
Magono (1953), Nakaya and Tereda, (1935), Japan	0.8 - 3	0.13

ТАБЛИЦА 1 РАЗМЕРЫ ПЛОТНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ ЛЬДА.

Формы крупинок и градин

В облаках с достаточно большими восходящими потоками образование может продолжаться до образования града. Наблюдались различные формы и текстуры поверхности, включая конические формы, сплюснутые сфероидальные формы, формы яблок, град с шипами и лепестками на поверхности и неправильной формы.

Найт (1986), Баржа и Исаак (1973) и Мэтсон и Хаггинс (1980) обнаружили, что отношение короткой оси к длинной изменялось от 0,95 для камней с максимальным размером от 1 до 5 мм и до примерно 0,6-0,7 для камней с максимальным размером от 50 до 60 мм. Большинство камней имели отношение осей 0,8. Ауэр (1972b) обнаружил, что распределение по размерам крупинки и града часто соответствует соотношению формулой:

$$n(d) = Ad^B \quad (1)$$

где d - диаметр частицы льда, $A = 561,3$ и $B = -3,4$ (Ауэр, 1972) для штормов на Высоких равнинах, и $A = 254$ и $B = -2,8$ для штормов на северо-востоке Колорадо.

Однако большинство исследований показали, что распределение по размерам для крупинки и града лучше всего подходит по экспоненциальному распределению типа Маршалла.

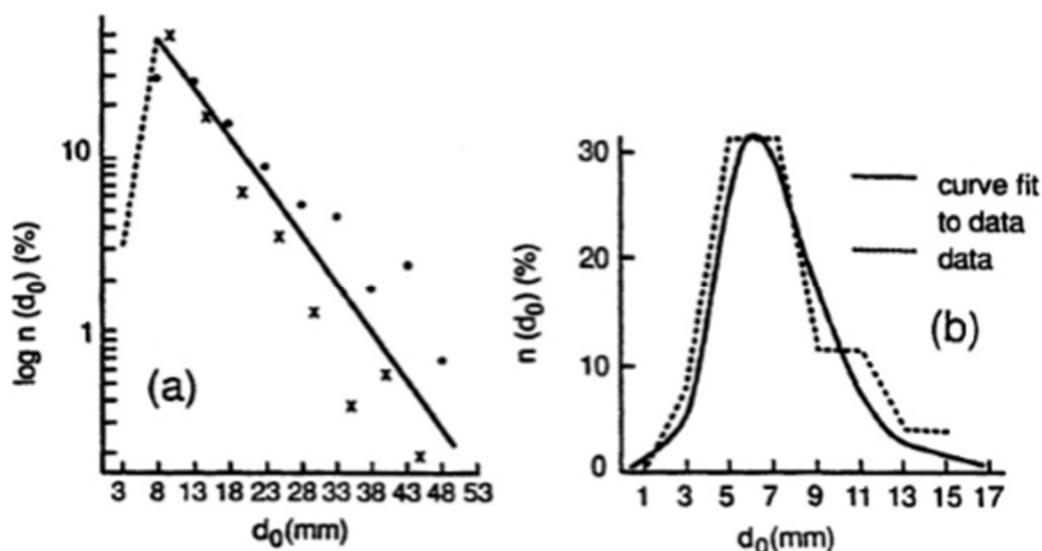


РИСУНОК 1 ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РАЗМЕРАМ ГРАДА (А)И ИХ ЗАРОДЫШЕЙ(В) ТИПА МАРШАЛЛА.

Смягчение

Посещение облаков иногда используется, чтобы попытаться уменьшить ущерб, вызванный градом. Увеличивая число замерзающих ядер, можно надеяться увеличить количество градов за счет их размера. Йодид серебра наиболее часто используется для этого. Но метеорологи делятся на эффективность этого метода.

Эффективность град пушки является спорной и не была доказана, больше метеорологов не понимают, как это может быть; однако он по-прежнему используется некоторыми производителями в нескольких странах.

1.3. Градоопасное Облако.

Что такое облако?

Облако представляет собой совокупность мельчайших частиц жидкой воды (капли) или твердого вещества (лед) или того и другого, которые оба находятся в атмосфере и, как правило, не влияют на землю. Таким образом, вопреки тому, что можно подумать, облако образовано не только из водяного пара. Однако облако может также включать более крупные частицы жидкости или ледяной воды, неводные жидкие частицы (кислоты), твердые частицы от промышленных паров, пыль, пары, соль.

Облака играют ведущую роль в предупреждениях и прогнозах погоды. Они стимулируют водный цикл и всю климатическую систему.

Появление облака зависит от полученного им света, природы, размера, количества и распределения частиц, которые его составляют.

- Капли воды:

Они образуются в насыщенной атмосфере (влажность 100%) путем конденсации водяного пара (всегда присутствующего в атмосфере) в присутствии взвешенных твердых частиц, называемых ядрами конденсации. Эти ядра конденсации играют роль катализатора и имеют различное происхождение:

- минеральное происхождение: вулканическая сажа, кристаллы песка
- морское происхождение: кристаллы морской соли оторваны ветром
- человеческое происхождение: промышленные ожоги, загрязнение

Капли выпадают обычно со скоростью от нескольких мм/с до 1 см/с без перемешивания.

Диаметр капли составляют диапазон от 2 до 200 микрон (количество от 300 до 600 /м³)

Расстояние между двумя каплями: в среднем 1,4 мм или в 70 раз больше их диаметра. Содержание воды в облаках:

В устойчивом облаке есть многочисленные капли небольшого диаметра и конденсированная вода порядка 0,5 г / кг облака.

В нестабильном облаке значительно меньше капель, но большого диаметра (в среднем 40 микрон) и конденсированной воды порядка 5 г / кг облака.

- Ледяные кристаллы:

Они образуются путем кристаллизации капли воды вокруг твердой частицы, называемой ядром льда, при $T < 0 \text{ } ^\circ \text{C}$. Эти ядра происходят из

вулканического пепла, сажи или песка и имеют кристаллическую структуру, подобную льду.

Диаметр кристаллов немного больше, чем у капель.

Скорость падения: обычно большее до 50 м /с без движения вверх

Расстояние, разделяющее два кристалла: близко к тому из капель (то есть футбольного мяча каждые 20-30 метров)

Количество ледяных кристаллов в облаке: переменное и зависит от температуры на пример:

Когда температура -3°C в облаке, мы наблюдаем появление кристаллов,

-12°C количество кристаллов увеличивается (кристалл на 10 м^3 облака)

-32°C : отмечено увеличение их количества (10 на 10 м^3 облаков) и при -41°C количество ледяных кристаллов систематическое и жестокое увеличивается (больше не переохлажденная вода)

Облако классифицируются:

1. по условиям формирования разделяются
 - Конвективные облака
 - Волнистые облака
 - Облака восходящего скольжения
 - Облака турбулентного перемешивания
2. по морфологии:
 - облака верхнего яруса (в средних широтах высота — от 6 до 13 км)
 - Облака среднего яруса (в средних широтах высота — от 2 до 6 км)
 - Облака нижнего яруса (в средних широтах высота — до 2 км)
 - Облака вертикального развития (облака конвекции)

Краткая международная классификация облаков
по ярусам и основным формам (видам, родам).

№ пп	Название (русское)	Название (латинское)	Произношение	Сокращенное обозначение
А. ОБЛАКА ВЕРХНЕГО ЯРУСА (высота нижней границы выше 6 км)				
1.	Перистые	Cirrus	Циррус	Ci
2.	Перисто-кучевые	Cirrocumulus	Циррокумулюс	Cc
3.	Перисто-слоистые	Cirrostratus	Цирростратус	Cs
В. ОБЛАКА СРЕДНЕГО ЯРУСА (высота нижней границы от 2 до 6 км)				
4.	Высоко-кучевые	Alto cumulus	Альтокумулюс	Ac
5.	Высоко-слоистые	Altostratus	Альтостратус	As
С. ОБЛАКА НИЖНЕГО ЯРУСА (высота нижней границы ниже 2 км)				
6.	Слоисто-кучевые	Stratocumulus	Стратокумулюс	Sc
7.	Слоистые	Stratus	Стратус	St
8.	Слоисто-дождевые	Nimbostratus	Нимбостратус	Ns
ОБЛАКА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ				
9.	Кучевые	Cumulus	Кумулюс	Cu
10.	Кучево-дождевые	Cumulonimbus	Кумулониimbus	Cb

ТАБЛИЦА 2 ТИПЫ ОБЛАКОВ.

Образование градоопасного облака

Мы знаем, что штормы образуются в кучевых облаках, которые надуваются к вершине тропосферы и образуют горы влажностей, а именно кучево-дождевые облака.

Кучево-дождевые облака «рождаются» на небольшой высоте, их вершина составляет от 5 до 15 км. Их толщина, которая часто составляет 7 км-10км, очень толстая. Он имеет одно из самых больших вертикальных расширений в семействе облаков. Его база находится в нескольких сотнях метров на высоте 3000 метров от земли. Он может достигать максимума от 8000 до 15000 м, потому что его вершина может иногда превышать тропопаузу.

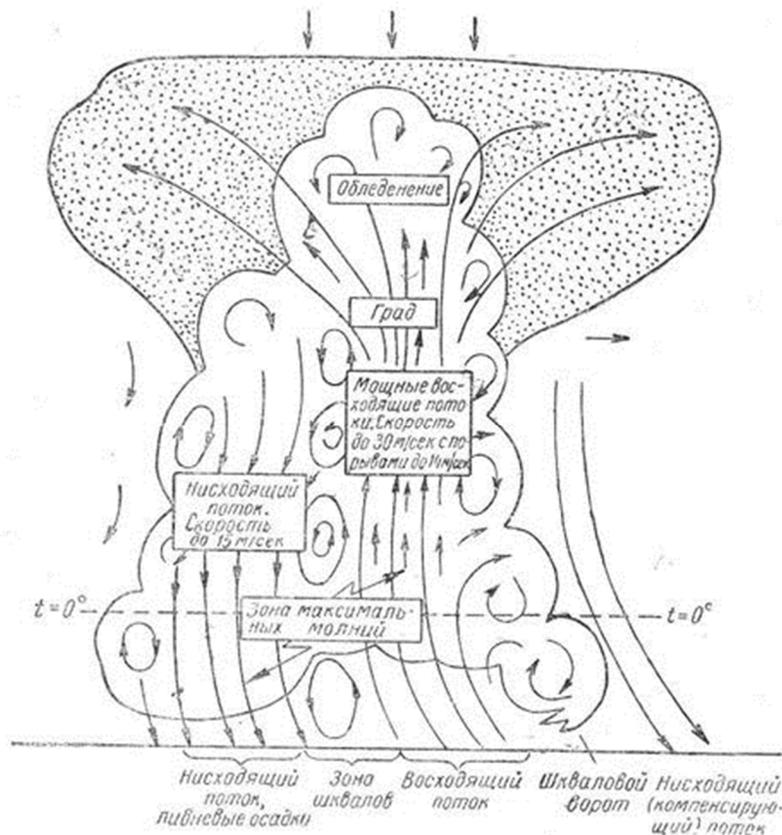


РИСУНОК 2 СХЕМА НИСХОДИВШЕЙ И ВОСХОДИВШЕЙ ДВИЖЕНИЕ В ОБЛАКЕ.

Кучево-дождевые облака имеют конвективное происхождение, поэтому их эволюция происходит путем конвекции. Фактически это куча очень сильного вертикального расширения, верхняя часть которого состоит из кристаллов льда.

Конвекция

Град - это осадки, которые образуются, когда восходящие потоки во время грозы несут капли дождя вверх в чрезвычайно холодные области атмосферы. Град растет при столкновении с переохлажденными каплями воды. (Переохлажденные капли - это жидкие капли, окруженные воздухом,

который находится ниже уровня замерзания, что является обычным явлением при грозах.)

В метеорологическом смысле использование термина «конвекция» определяется вертикальным переносом свойств воздуха, причем горизонтальный перенос указанных свойств обозначается другим термином: горизонтальная адвекция. Конвекция - вездесущее явление в атмосфере Земли. Это может быть вызвано потеплением почвы солнцем, движением массы холодного воздуха над относительно теплым водоемом или другими явлениями (включая различия в альбедо), которые вызывают относительное потепление нижней части атмосферного слоя относительно его верхней части.

Влажная конвекция приводит к развитию облаков с сильным вертикальным движением от кучевых облаков к кучево-дождевым облакам. Различные типы их ответственны за штормы, некоторые из которых являются насильственными. Широкое распространение влажной конвекции обеспечивает системы, начиная от зерна до тропических циклонов и муссонов, которые могут вызвать в разливочный дождь, то град, то нисходящие порывы и торнадо.

Сухая конвекция дает другие явления без образования облаков, восходящего воздуха, не вызывая конденсацию из-за отсутствия влаги. Среди них морской бриз, водовороты пыли и огня, межтропическое движение и многие другие явления.

Восходящее конвективное движение вызвано разницей температур между поднятым воздушным паром и более холодной окружающей средой на высоте. Действительно, график остывает, но, согласно адиабатическому температурному градиенту, в нестабильных случаях он меньше температуры окружающей среды. Поэтому он менее плотный, чем окружающая среда, и

подвергается архимедову восходящему толчку. Эта разница является потенциальной доступной конвективной энергией

Это движение вверх сопровождается движением вниз соответствующего объема более плотного (более холодного) воздуха по тому же принципу. Плотность нисходящего воздуха больше плотности восходящего воздуха; поэтому происходит уменьшение центра тяжести системы, что интерпретируется как преобразование потенциальной гравитационной энергии в кинетическую энергию.

Количество энергии, вовлеченной в это преобразование, может быть значительным и приводить к значительным движениям вверх и вниз, создавая турбулентность.

Если есть конденсация, происходит образование конвективных облаков, которые могут дать сильные удары ветров, в количестве осадков интенсивности и молнию. Если сдвиг ветра с высотой благоприятен для переноса вихрей, могут образоваться торнадо. Если содержание воды очень важно, вы можете получить проливные дожди и даже град.

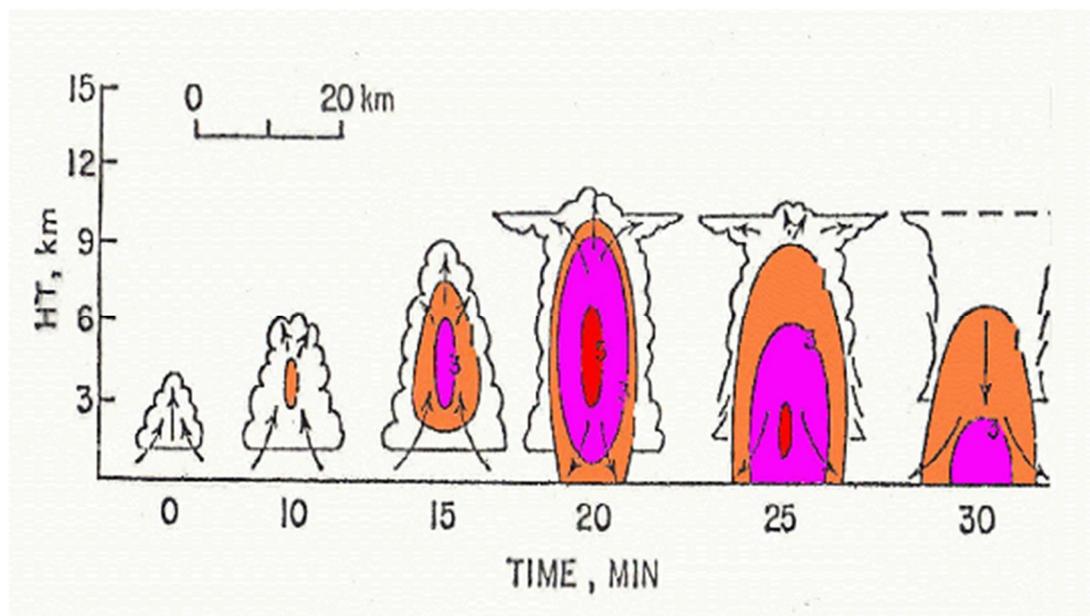


РИСУНОК 3 ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ШТОРМА, ОДНО ИЗ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С АТМОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИЕЙ.

Вид градоопасное облако

Форме грозы способствуют жаркие и влажные условия у поверхности, но более холодные и сухие на высоте. Относительно мягкие, так называемые кучево-воздушные массы (обычно поздние полуденные бури) образуются в результате конвекции, вызванной солнечным нагревом воздуха у земли.

Существует несколько видов кучево-дождевых облаков:

- Лысые (лат. *Cumulonimbus calvus*, *Cu calv.*) — вершина напоминает округлые белоснежные купола слегка волнистого строения и не имеет перистовидной верхней части. Иногда появление таких облаков служит предвестником грозы.

- Лысые с грозovým валом (лат. *Cumulonimbus calvus arcus*, *Cb calv. arc.*) — отмечаются тогда, когда в передней части приближающегося облака образуется тёмный дугообразный облачный вал, появление которого сопровождается шквалистыми порывами ветра.

- Волосатые (лат. *Cumulonimbus capillatus*, *Cb cap.*) — верхняя часть имеет чётко выраженное волокнистое перистовидное строение. Распространение таких облаков обычно происходит по горизонтали, в связи с чем они приобретают подобие веера или наковальни.

- Волосатые с грозovým валом (лат. *Cumulonimbus capillatus arcus*, *Cb cap. arc.*) — признаки её аналогичны лысым облакам с грозovým валом.

- С наковальней (лат. *Cumulonimbus incus*, *Cb inc.*) — отмечаются тогда, когда верхняя обледеневшая часть облака растекается в стороны и приобретает вид гигантской наковальни над верхней частью облака.

- Плоские (лат. *Cumulonimbus humilis*, *Cb hum.*) — характеризуются отчётливой кучевообразной формой и волокнистой структурой, однако слабо развиты по вертикали

Когда в кучевых облаках воздух становится нестабильным, во всей камере преобладает восходящий поток, который будет образовывать кучево-дождевые облака. Кучево-дождевые облака часто связаны с такими штормовыми явлениями, как торнадо, бури ...

Существуют: восходящие воздушные потоки горячего воздуха свыше 30 м/с

Восходящий поток - это движение воздуха, направленное вверх. Это обеспечивает вертикальный и боковой рост кучево-дождевых облаков. Скорость его подъема пропорциональна потенциальной доступной конвективной энергии и, следовательно, зависит от количества тепла и влаги, содержащихся в нижней половине тропосферы. Таким образом, нестабильный, но очень сухой воздух в нижних слоях, преодолеваемый кусочком влажного воздуха на среднем слое, не позволит развивать очень энергичные восходящие потоки. Напротив, горячий и очень влажный воздух от нижнего слоя до среднего слоя будет способствовать плотным и быстрым кучево-образным изменениям, подходящим для наступления интенсивных гроз.

Нисходящие потоки холодного воздуха (конвективная ячейка).

Для наблюдателя на земле нисходящий поток - это внезапный поток свежего или холодного воздуха на краю шторма. Это отрицательный ответ восходящего потока и на том же уровне, что и этот, является частью явления конвекции. Нисходящий ток устанавливается из образования наименьшего конвективного облака.

Рождение такого тока начинается, когда вес воздуха из-за скопления осадков в нижней части грозового облака вызывает его движение вниз. Испарение осадков в более сухом воздухе вызывает охлаждение, которое также влияет на это движение. Существует много факторов, таких как размер

и плотность ливневой камеры, количество и характеристики осадков, направление и скорость переноса на среднем уровне, которые способствуют возникновению сильных нисходящих потоков, особенно когда втекание сухого воздуха проникает в средний уровень кучево-дождевого облака (4000м) и распространяется под основным восходящим потоком, где выпадают осадки. В этом типе конфигурации, основным нисходящим потоком является ток относительно общего оседания осадков. На самом деле вокруг грозы множество вторичных нисходящих течений.

Вверху температура очень низкая, так как тропопауза ниже 50 ° С. Таким образом, существует большая разница температур между верхней и нижней частью кучево-дождевых облаков. Когда облако достигает максимальной высоты, образуется сильный нисходящий курс, приводящий к дождю или граду от замерзшей плоской вершины облака (наковальня). Нисходящий поток холодного воздуха в конечном итоге разрушает восходящий поток горячего воздуха, питающего облако.

Электризация градоопасных облаков

Мы знаем, что кучево-дождевые облака состоят из сотен миллионов капелек воды, ледяных кристаллов, снега и града. Из-за сильных вертикальных движений, которые его оживляют, крупные частицы (градины, капли дождя ...) сталкиваются с ледяными кристаллами. Трение различных частиц между ними вызывает образование электростатических зарядов, которые накапливаются в нескольких местах облака. Самые маленькие положительные ледяные кристаллы всасываются восходящими потоками, а затем рассеиваются в верхней части, в то время как самые тяжелые капли воды, несущие отрицательные заряды, переносятся к нижней части облака.

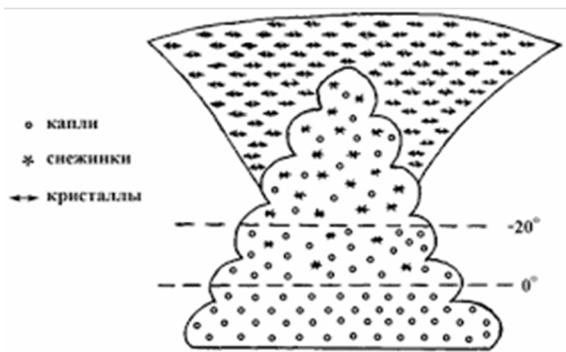


РИСУНОК 4 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В КУЧЕВЫХ ОБЛАКАХ.

1.4. Служба по борьбе с градом

Во время шторма частицы льда, называемые градом, могут иметь длину несколько сантиметров. Дожди обычно недолговечны, но падение очень быстрое. Действительно, расчеты показали, что град около 1 см в диаметре будет иметь скорость спуска 9 м / с или около 32 км / ч. Таким образом, град 8 см в диаметре достигает 48 м / с или 172 км / ч.

Тогда можно очень быстро представить себе ущерб, который градины могут нанести при воздействии на твердое тело. Ливни часто разрушительны для товаров, особенно автомобилей и домов. Большие градины также опасны для людей и животных. Жертвы также включают фермеров, их зерновые культуры чрезвычайно уязвимы для этого бедствия.

В настоящее время град находится в центре забот сельскохозяйственной отрасли. За последние десять лет количество гроз увеличилось на 350%. Ущерб в этот период был значительным для фермеров.

В Россия, град часто встречается в Южном и Северокавказском федеральных округах: в Ставропольском крае, на Кубани, в Краснодарском крае. Вот одно из лаконичных сообщений на Нальчикской метеорологической станции: «С 9 по 10 июня 1939 года ... град размером с куриное яйцо упал в сопровождении сильного дождя. В результате погибло

более 60 тысяч гектаров пшеницы и около 4 тысяч гектаров других культур; около 2 тысяч овец были убиты.»

Как установили ученые и синоптики, именно в предгорных районах Большого Кавказского хребта расположена «кухня» погоды обширного северокавказского региона. Большое падение высоты, высокая влажность, восходящие потоки воздуха и нестабильность атмосферных процессов - все эти факторы провоцируют образование здесь плотных облаков и опасных для града облаков.

Ежегодно мировой экономике наносится ущерб 11 миллиарда долларов. Поэтому во многих странах мира (Россия, США, Аргентина, Бразилия, Франция, Германия, Испания, Южная Африка и т. Д.) Проводятся научно-исследовательские и производственные работы, чтобы уменьшить ущерб от града в несколько раз. Пионерами в разработке противоголовоых технологий стали ученые СССР. Начиная с 1956 года, Эльбрусской экспедиция Института геофизики АН СССР начала работы по изучению образования ледяных осадков под руководством профессора Сула-квелидзе Г.К.

До начала практической работы по борьбе с градом в СССР проводились многолетние теоретические и экспериментальные исследования с участием десятков научных коллективов, таких как главная геофизическая обсерватория, центральная аэрологическая обсерватория, институт прикладной геофизики, высотный институт, геофизический институт, закавказские и среднеазиатские научно-исследовательские институты, ленинградский и одесский гидрометеороинституты, московский, ленинградский и киевский университеты и другие.

Технология воздействия на опасные облака заключается в следующем. Чаще всего используется реагент "йодистое серебро". Используется для распыления с самолетов, а также с ракетных систем. Реактив йодида серебра является экологически чистым.

Каждая ракета несет 18 граммов реагента, смешанного с 1 кг черного порошка, и испускает 5×10^{15} активных частиц йодида серебра в облако. При курении реагент вводится в переохлажденную часть облака, отвечающую за образование и рост града. Микроскопические частицы «йодида серебра» захватываются переохлажденными каплями, превращаясь в кристаллы, которые превращаются в искусственные ядра града. Искусственные ядра града конкурируют с естественными зародышами града за влажность, содержащуюся в облаке, и не позволяют граду расти до больших размеров. В результате в облаке образуется огромное количество маленьких градов, похожих на лавины, которые, выпадая из облака, тают в теплой части атмосферы и достигают земли в виде дождя.

Сложность заключается в том, чтобы вовремя определить град в облаке и распылить там реагенты. В целом вся борьба с градом напоминает противовоздушную оборону. Радар обнаруживает град облака почти в 40 км до защищаемых территорий. Градовые облака развиваются очень быстро. Весь процесс образования града занимает 30-40 минут, поэтому воздействовать на облако нужно не позднее, чем через 15-20 минут после начала его быстрого развития. Уточняют координаты крупнокапельной зоны и пускают в ход противогодавые пусковые установки со специальными ракетами.

2. Микрофизические процессы для формирования града

2. 1. Слоистая структура градов.

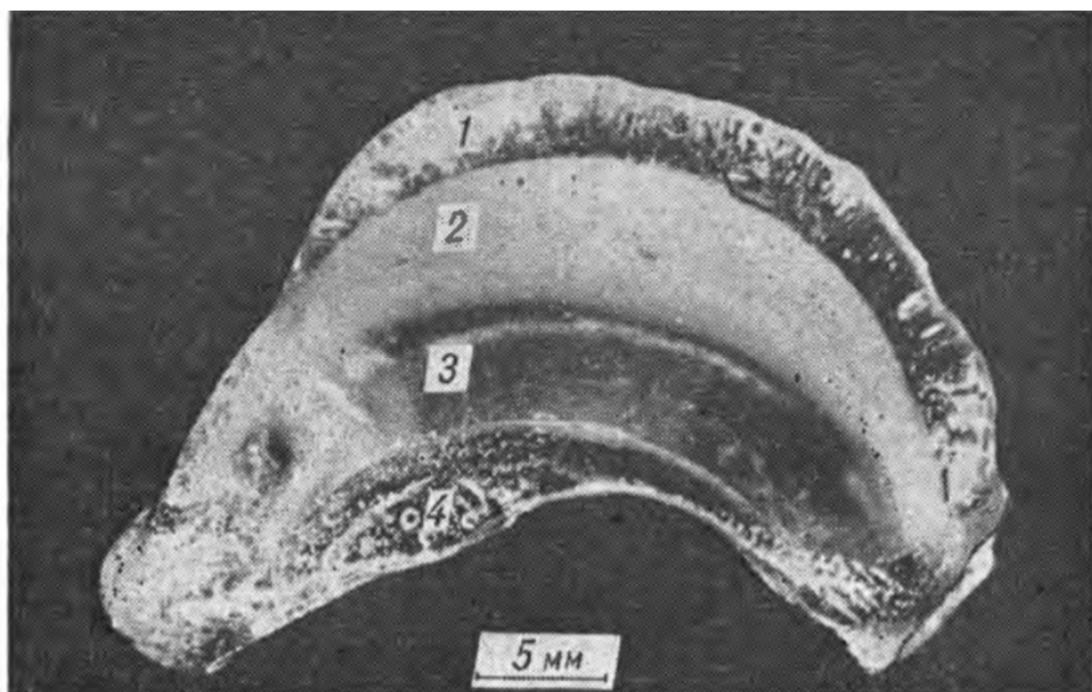


РИСУНОК 5 СЛОИСТАЯ СТРУКТУРА ГРАДИНЫ.

Поперечное сечение больших градов показывает, что у них есть структура кожи лука, то есть сформированная из толстых и полупрозрачных слоев роста, чередующихся с тонкими, белыми и непрозрачными слоями.

Теория заключалась в том, что градины подвергались нескольким поездкам в оба конца, возвращаясь во влажную зону, а затем снова вступали

в новую восходящую фазу, которая создавала бы последовательные слои. Однако теоретические исследования и поля показали, что это не тот случай.

Фактически, поднимающийся град пересекает области облака, где концентрация влаги и переохлажденных капель различается. Его темпы роста изменяются в зависимости от найденных изменений. Скорость аккреции капель - еще один фактор роста. Последние агломерируются при контакте с градом. Таким образом, когда градиент переходит в зону, богатую капельками, он приобретает полупрозрачный слой, захватывая их, тогда как в районах бури, где это в основном водяной пар, который доступен, он образует слой непрозрачного белого мороза.

Кроме того, град движется вертикально с переменной скоростью в зависимости от его положения в восходящем потоке, а также его веса. Это то, что будет варьировать толщину слоев, потому что скорость улавливания переохлажденных капель зависит от относительных скоростей между ними и градом, причем некоторые темпы роста благоприятствуют этому.

Рост града приносит скрытое тепловыделение, которое может удерживать снаружи градиентной жидкости, делая ее более «липкой». Град может затем собираться в два или более, в зависимости от столкновения с образованием большим, неправильной формой.

Град затем поднимается до тех пор, пока его вес больше не будет поддерживаться восходящим потоком, который занимает не менее тридцати минут, учитывая силу этих течений в град-шторме, вершина которого обычно на высоте более 10 км. Затем он начинает спускаться на землю, продолжая свой рост теми же процессами, пока не выйдет из облака. Поэтому этот уникальный путь в шторме достаточен для объяснения многоуровневой конфигурации града. Единственный случай, когда мы можем говорить о многолучевом распространении, - это вопрос о многоклеточных штормах где градина может быть извлечена из верхних материнской клетки и быть включена в восходящем потоке из более интенсивной дочерней клетки, но это исключительный случай.

Обледеневшие кристаллы льда и градины образуются в облаках, которые содержат, как и кристаллы льда, так и переохлажденные капли.

Полевые исследования показали, что в таких облаках и кристаллы снега, и замерзшие капли могут служить зародышами для формирования крупинок. Таким образом, Харимая (1976) тщательно разрезал и разбирает частицы природного крупинки под микроскопом, чтобы найти как снежные кристаллы, так и замерзшие капли в качестве центральных частиц.

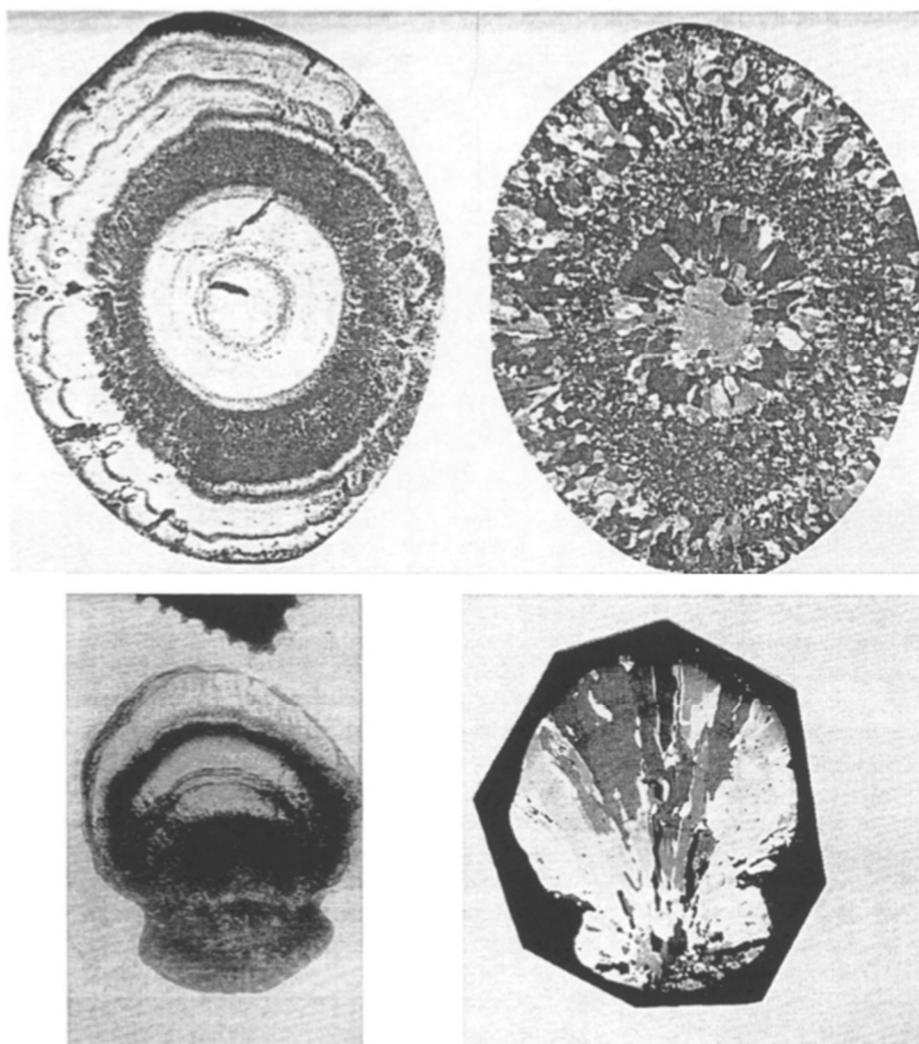


РИСУНОК 6 ТОНКИЕ РАЗРЕЗЫ ГРАДОВ .

Важность замерзших капель для образования крупинок также подчеркивалась Пфлаум (1978), который экспериментально исследовал процессы роста и кристаллические пластины, когда они были свободно подвешены в вертикальном воздушном потоке аэродинамической трубы.

В литературе существует значительное противоречие в отношении типа частиц льда, которые могут служить зародышем для крупинок конической формы.

Аренберг (1941) предположил, что конические крупы возникают на плоских снежных кристаллах, которые, падая под действием силы тяжести, в основном изморозь на их нижней стороне. В таких условиях предполагалось, что изморозь превращается в обращенную вниз точку, образуя конусообразную крупку с вершиной вниз. Холройд (1964) предположил, что конические крупинки являются результатом агрегации частично изогнутых игольчатых кристаллов, которые продолжают иная после агрегации. Накая (1954), Лист (1958а, б) и Найт (1973а), с другой стороны, отстаивают идеи Рейнольдса (1876), который предположил, что конический крупинки является результатом плоских ледяных кристаллов, которые преимущественно изобилуют их нижняя сторона, изморозь развевается на ветру, а не превращается в точку. Такое поведение вызывает развитие конической крупинки, которая падает с вершиной вверх и имеет свой зародыш около вершины. Вейкманн (1964) и Такеда (1968) предположили, что конический крупинки также может начинаться с замороженных капель. Это предположение было экспериментально подтверждено исследованиями в аэродинамической трубе Пфлаум (1978). В исследованиях начальных стадий обледенения кристаллов в облаках разных типов, Уилкинс и Ауэр (1970), Хоббс (1971а), Кикучи (1972а) и Ивай (1973) обнаружили, что как столбчатые кристаллы льда, так и пластины из кристаллов льда должны расти путем диффузии до определенного критического размера, прежде чем они смогут расти дальше в результате обледенение. Пример для этого требования приведен на рисунке для плоских кристаллов.

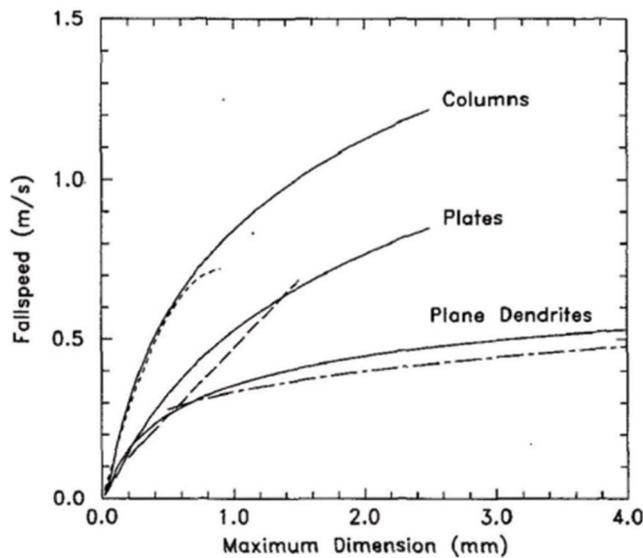


РИСУНОК 7 ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ПАДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ ЛЬДА.

Мы замечаем, что с увеличением разветвленности кристалла начало ободка увеличивается от примерно $150\mu\text{m}$ для одной пластины до примерно $800\mu\text{m}$ диаметра для дендритного кристалла. Хотя начало ободка для пластинчатых кристаллов зависит только от диаметра кристалла, начало для столбчатых кристаллов зависит как от их ширины, так и от их длины. Таким образом, их критическая ширина должна быть близкой $30\mu\text{m}$, а их критическая длина между 125 и $225\mu\text{m}$. Проверка этих результатов была представлена Рейкингом (1979), Борисом (1983) и Ауэром (1970).

Рейкинг (1979) и Брутж (1987) отметили, что колонны с крышками и двойные пластинчатые кристаллы особенно хороши обледеневшие. Эти кристаллы начинают изгибаться с диаметром до $50\mu\text{m}$, и сильно изогнуты на диаметрах от 150 до $200\mu\text{m}$.

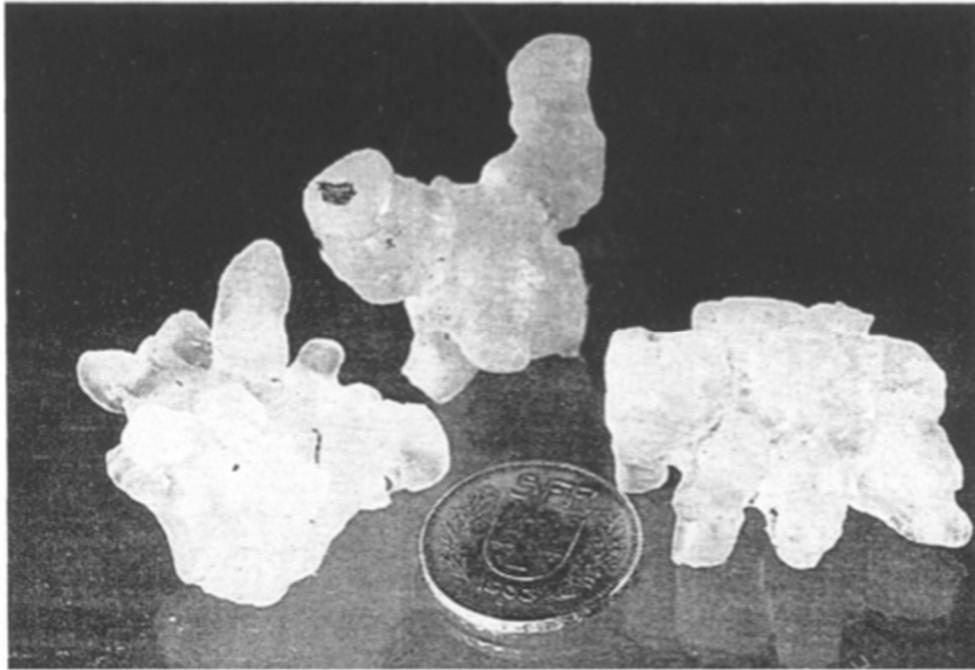


РИСУНОК 8 СРАВНЕНИЕ ГРАД С МОНЕТАМ.

Та часть собранной воды, которая немедленно замерзает, образует скелетный каркас или сетку дендритных кристаллов льда, в которой незамерзшая часть собранной воды сохраняется, как в губке, температура поверхности которой равна 0°C .

Гитлин (1968) и Браунинг (1968) использовали calorиметрические методы для анализа свежеснежавшего града в различных географических точках. Они обнаружили, что вода, составляющая до 16% от общей массы, была встроена в структуру льда некоторых градов. В более определенном исследовании Найт (1973b) проанализировал естественные градины с помощью техники гашения и пришли к выводу, что, хотя некоторые градины иногда испытывают губчатый рост, этот режим роста не является правилом для всех градин.

Исследования града методом тонкого среза показывают, что обычно градиент имеет одну отдельную центральную единицу роста или росток. Градины с двумя центрами роста существуют, но встречаются крайне редко.

В литературе существует значительное противоречие относительно природы этой центральной единицы роста. Лист (1958а, В; 1959; 1960а, В) и Найт (1976, 1981) обнаружили, что около 80% града, упавшего в Швейцарии и в Колорадо, соответственно, имели зародыши крупинок.

Точно так же Моссоп, Киддер (1964) и Карт (1966) обнаружили, что большой процент града, собранного во время ливня в Южной Африке, возник в виде частиц крупы. Однако Маклин (1960) обнаружил, что у большинства градов, собранных в Англии, были четкие центры роста, и они интерпретировали это как означающее, что эти градины возникли в виде крупных замороженных капель. Оба типа центров роста были обнаружены Найтом (1970b) и Федерером и Вальдвогелем (1978), которые исследовали большое количество града, упавшего в США и Швейцарии соответственно. Они наблюдали зародыши от нескольких миллиметров до 1 см в диаметре. Некоторые из них были более или менее непрозрачными и имели коническую форму, в то время как другие были прозрачными или пузырьковыми и имели сферическую форму. Таким образом, имеющиеся данные указывают на то, что град может возникать либо в виде крупинки, либо в виде замерзших капель, в зависимости от географического положения.

Проанализировав большое количество града, чтобы определить влияние региональных различий на структуру их эмбрионов, Найт (1981) предположил, что для Южной Африки от 62 до 83% эмбрионов были замороженными каплями. Для других мест процентное соотношение было следующим: для Колорадо от 6 до 27%, для Швейцарии - 63%, для Оклахомы 70% и для Южной Африки от 35 до 54%.

Объемная плотность града имеет тенденцию радиально варьироваться от поверхности к ядру с чередующиеся концентрические слои более низкой плотности. Было обнаружено, что плотность таких оболочек града обычно колеблется между 0,8, но плотность раковин также низка, как это также наблюдалось (Маклин,1960; Моссоп и Киддер, 1961; Проди, 1970; Лист 1970а).

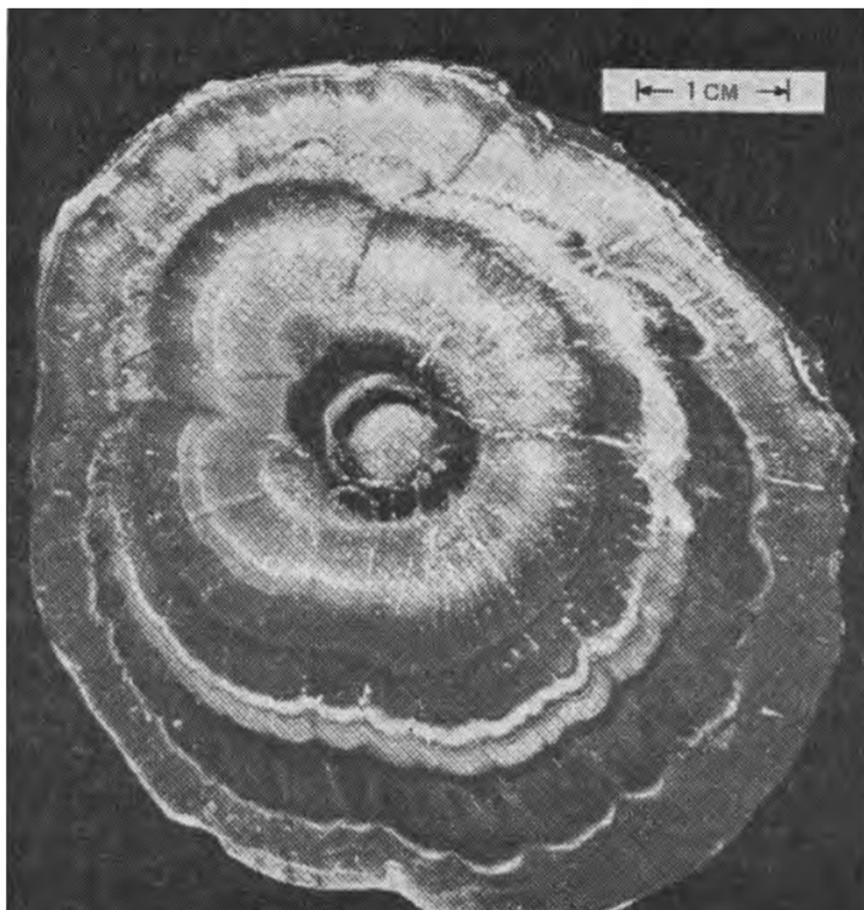


РИСУНОК 9 ТОНКИЙ РАЗРЕЗ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ГРАДА.

Изменения плотности отражают различные количества захваченных пузырьков.

Многие из этих пузырьков довольно регулярно группируются в концентрических слоях, которые попеременно содержат большее и меньшее число.

Оболочки града с большим количеством пузырьков выглядят довольно непрозрачными, в то время как оболочки только с пузырьками выглядят как прозрачный лед. Размер и количество воздушных пузырьков в граде были изучены Лист и его коллеги обнаружили.

Из исследования плоских надрезов через каменные центры Лист и его коллеги обнаружили, что распределение пузырьков по размерам было нормальным. Концентрация плоских чисел пузырьков варьировалась по поверхности среза более чем на два порядка, от примерно 50 до 500 см^{-2} .

Непрозрачных оболочек, состоящих из множества меньших пузырьков, в то время как прозрачные оболочки содержали меньше и больше пузырьков. Слои в слоях камня, осажденные в режиме быстрого роста, Каррас и Маклин (1975) обнаружили объемную концентрацию пузырьков воздуха 10^6 до 10^8 см^{-3} по сравнению с пузырьком воздуха размеры от 2 до 8 мкм в диаметре. В слоях, нанесенных на влажный рост в этом режиме концентрация пузырьков воздуха составляла 10^5 до 10^6 , а диаметр пузырьков составлял от 20 до 1000 мкм .

При исследовании тонких срезов частиц града с помощью поляризованного света обнаруживается вторая интересная структурная особенность: обнаруживается, что лед сечений является поликристаллическим, с крупными и мелкими отдельными кристаллитами (одиночными кристаллами льда) в чередующихся слоях. Большинство кристаллитов имеют тенденцию принимать предпочтительные ориентации.

Подробные исследования размеров и ориентации кристаллитов в естественных градах были выполнены. Найт (1968, а, б), Лист (1970), Леви (1970, а, б), Маклин (1970) и Рай (1974). Они показали, что прозрачные слои, относительно свободные от воздушных пузырьков, как правило, состоят из довольно крупных кристаллитов, в то время как непрозрачные слои с относительно высокими концентрациями воздушных пузырьков, как правило, состоят из множества мелких кристаллитов.

Лист (1970) определил, что в плоскости среза кристаллиты имеют площади поверхности, которые находятся между $1 \cdot 10^{-3}$ и $8 \cdot 10^2 \text{ см}^2$.

Маклин (1970) и Рай (1975) обнаружили, что длина кристаллитов уменьшается с 8 до 0,25 мм, а ширина с 1 до 0,2 мм при понижении температуры окружающей среды от -5 до -30 ° С. Хотя кристаллиты града случайным образом ориентированы в одних оболочках, они предпочитают ориентироваться в других. Найт (1968) и Леви (1970а, б) обнаружили, что в некоторых оболочках кристаллиты имеют свою кристаллографическую ось с, как правило, либо параллельную, либо перпендикулярную к радиальному направлению роста града. Лист (1970а, б) обнаружили кристаллиты с предпочтительной ориентацией по оси, параллельной радиальному направлению роста в прозрачных оболочках града, и с довольно случайными ориентациями в непрозрачных оболочках.

2.2. Влажные и сухие режимы роста крупинки и града.

Частицы льда, которые растут в результате столкновений с переохлажденным и каплями, имеют температуру поверхности, которая выше, чем у воздуха, окружающего их, вследствие выделения скрытой теплоты во время процесса замораживания. Этот нагрев ледяной частицы противодействует и в стационарном состоянии просто уравнивается передачей тепла окружающему воздуху за счет теплопроводности и испарения, если воздух насыщен водяным паром.

Пока скрытая теплота замерзания рассеивается от растущей частицы льда таким образом, что ее температура остается ниже 0 ° С, вся аккрецированная облачная вода должна замерзнуть на частице льда. Затем

считается, что частица растет в так называемом режиме сухого роста (Людлам, 1958).

С увеличением содержания жидкой воды в облаке, увеличением размера капли и увеличением частоты столкновений между каплями и частицей льда температура растущей частицы постепенно повышается. Это повышение температуры обычно заканчивается, когда температура поверхности частицы льда приближается к 0°C . В таких условиях роста не вся накопленная вода превращается в лед, количество образованного льда определяется скоростью, с которой тепло рассеивается из частицы. В настоящее время считается, что частица льда растет в режиме влажного роста (Людлама, 1958).

Критические условия, при которых вся аккрецированная вода замерзает на частице льда и приобретает температуру 0°C в твердой фазе, известна как предел Шумана-Людлама; таким образом, отмечает границу между двумя режимами роста.

Шуман (1938) и Людлам (1958) изучали термодинамику режима влажного роста при предположении, что растущая частица льда останется твердой и сбросит всю избыточную воду, приобретенную в виде жидкой пленки, на ее поверхность.

Тем не менее, исследования в аэродинамической трубе Лист (1959, 1960а, б) и Маклин (1961) показали, что в режиме влажного роста часто происходит незначительное выпадение или его полное отсутствие. Кроме того, предположение о непроницаемых частицах льда оказалось неверным; скорее, они были найдены как состоящие из плотного ледяного каркаса, чьи капилляры заполнены водой и воздушными пузырьками, названными Листом губчатым льдом (1965). Такой губчатый лед может либо образовываться непосредственно, если теплообмена между растущим ледяным месторождением и окружающей средой недостаточно для замораживания всей аккрецированной воды (последняя удерживается в сетке ледяных

дендритов), либо путем впитывания незамороженной воды в пористый лед (так называемое вымачивание) образуется заранее во время роста частиц льда в режиме сухого роста.

Мягкий лед был предметом многочисленных исследований. Губчатость некоторых естественных градов была измерена Гитлин (1968) и Браунинг (1968). Рыцарь и Рыцарь (1968a, b, 1973b) искали доказательства губчатости в естественных градах, которые полностью замерзли. Губчатость обледенения, выращенного в лабораторных условиях, была исследована Лист (1959), Маклин (1961), Бейли и Маклин (1968a, b), Гойер (1966) и Эшворт и Найт (1978).

Потеря воды была исследована Карас, Маклин (1973), Джоэ (1976) и Лист (1977). Лесинс (1980), Джо (1982) и Лист (1986) определили скорости выпадения и распределение капель по размерам из экспериментов в аэродинамической трубе с вращающимися ледяными цилиндрами и сфероидальными моделями града.

Они обнаружили, что как выпадение, так и губчатость сильно зависели от условий обледенения, скорости вращения ледяного цилиндра и скорости прецессии нутации ледяного сфероида. Микрофотографии изогнутых ледяных цилиндров (Маклин и Пейн, 1968) и изогнутых ледяных кристаллов и крупинки, свободно плавающих в аэродинамической трубе Маклин и Пейн рассматривали температуры воздуха от -11 до -22 ° C, температуры поверхности ледяного осадка от -3 до -20 ° C.

Они обнаружили, что коэффициент распространения, определяется как окончательный максимальный радиус падения до начального радиуса, варьирующийся от 1,3 до 6, в зависимости, главным образом, от скорости удара и температуры отложения.

I. Рост крупных частиц града.

В этом разделе мы рассмотрим некоторые основы роста крупинок и града. Важные компоненты моделей выращивания крупинок и града включают производство эмбрионов, диффузионный рост, сбор льда и снега, сбор облачных и дождевых капель, и таяние. Рост крупных частиц льда классифицируется как сухой рост или влажный рост.

A. Основы сухого роста

Основным требованием сухого роста является то, что вся аккрецированная масса является либо замораживается или замораживается полностью после сбора.

1. Паровая диффузия и аккреция жидкости (которая затем замораживается) приводят к скрытому тепловыделению. Для сухого роста температура ледяная частица должна оставаться ниже точки замерзания воды, так что поверхность остается сухой (твердый лед).

2. Плотность добавленной массы может быть разной чем плотность частицы льда. Например, плотность излучения может быть такой же низкой, как 170 кг / м^3 или большей как 917 кг / м^3 (твердый лед).

B. Основы мокрого роста

Во время влажного роста крупные частицы льда собирают значительные количества переохлажденной жидкая вода, некоторые из них

не замерзают, потому что скрытая теплота релиз нагревает ледяную частицу до точки замерзания.

1. Паровая диффузия и аккреция жидкости (которая затем замораживается) приводят к скрытому тепловыделению. Для мокрого роста скрытое тепловыделение что является результатом диффузии и замораживания паров переохлажденная вода достаточно значительна, так что ледяная частица температура поверхности повышается до 273,15К, точка замерзания воды.

2. Незамерзшая вода может оставаться на поверхности частиц льда, впитывать пористый лед (повторное уплотнение), или пролить в виде капелек.

3. Поверхность влажного льда во время влажного роста приводит эффективно ледяном льду прилипание эффективность. Это приводит к эффективному росту смешанной фазы.

4. Мокрый рост наиболее вероятен для крупных частиц льда в регионах с более высокое содержание жидкой воды ($> 1 \text{ г / кг}$) и температуры выше $-25 \text{ }^\circ \text{C}$. Об этом позже будет сказано больше.

2.3. Уравнение теплового баланса

Чтобы более точно смоделировать рост крупных частиц льда, таких как и крупнины используем уравнение баланса тепла, которое необходимо

решить, чтобы определить температуру частицы, и количество собранной переохлажденной жидкой воды, которая может замерзнуть.

А. Основные термины в уравнении теплового баланса.

Уравнение теплового баланса здесь представляет собой сумму четырех терминов ...

$$\pi \cdot R^2 \cdot E \cdot q_{ад} \cdot L_{к} \cdot V_R = \pi \cdot R^2 \cdot q_{ад} \cdot C_{ж}(T_{п} - T) + 4 \cdot \pi \cdot \lambda_{л} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{dT_{л}}{dr}\right)_{r=R} + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \lambda \cdot Nu(T_{п} - T) + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot D \cdot L_{к} \cdot Sh(\rho_{п} - \rho). \quad (2)$$

Здесь R – радиус градина

$q_{ад}$ –водность облака

D – коэффициент диффузии молекул водяного пара в воздухе.

E – Коэффициент коагуляции

$L_{к}$ –Удельная теплота замерзания воды

V_R –скорость градины

$C_{ж}$ –Теплоёмкость жидкого ядра

$T_{п}$ –Температура поверхности ледяного оболочки

T – Температура воздуха

$\lambda_{л}$ –коэффициент теплопроводности воздуха

Nu – Число Нуссельта

Sh – Число Шервуда

$\rho_{п}$ и ρ – Насыщающие плотности на поверхности ледяной оболочки и вдали от нее.

Левая часть уравнения представляет собой приток тепла, которое выделяется при замерзании переохлажденных капель на поверхности градины; первое слагаемое правой части – количество тепла, которое поглощается переохлаждёнными облачными каплями при повышении их температуры до T , второе слагаемое – количество тепла, которое отводится

внутри градины; третье слагаемое – количество тепла, которое отводится от поверхности градины за счет вынужденной конвекции и, наконец, четвертое слагаемое – количество тепла, которое теряется градиной за счет испарения с ее поверхности. Уравнение (2) является основным уравнением термодинамики градин.

2.4. Образование слоистой структуры градины.

А. Образование слоистой структуры градины при коагуляционном росте в облаке.

Механизм образования слоистой структуры льда, предложенный ниже, был применен для объяснения слоистой структуры градины.

Теория заключается в том, что на поверхности предмета, помещенного в поток переохлажденного водного аэрозоля, образуется пленка. Под действием касательного напряжения, создаваемого воздушным потоком, пленка приходит в движение. В зависимости от толщины пленки и скорости воздушного потока движение пленки может быть, как ламинарным, так и турбулентным. Это, в свою очередь, приводит к двум механизмам теплопередачи: молекулярному и турбулентному. При молекулярном механизме пленка оказывается неустойчивой, она исчезает, капли кристаллизуются, не сливаясь воедино, и образуют матовую неоднородную структуру льда. При турбулентном механизме кристаллизация идет под установившейся толщиной пленки и при этом образуется прозрачная однородная структура льда.

Механизм рассматривался в предположении, что температура фронта кристаллизации T равна температуре стабильной кристаллизации T_0 . Это позволило дать аналитическое решение задачи. В настоящем разделе

результаты, полученные будут применены для объяснения слоистой структуры градины.

Как известно установившаяся скорость падения градины V вычисляется по формуле:

$$V = \sqrt{\frac{8\rho_r g}{3\rho_B c_x}} R, \quad (4)$$

где ρ_r - средняя плотность градины. Отсюда, подставив (4) в (3), для $\overline{K_T}$, получим

$$\overline{K_T} = BRh^2, \quad (5)$$

где $B = 6,5 - 10 \text{ см}^{-1} \text{с}^{-1}$, - константа.

Так, например, для градины радиусом $R = 1 \text{ см}$ и толщиной пленки $h = 0,1 \text{ см}$ $\overline{K_T} = 6,5 \text{ см}^2/\text{с}^2$ что на три порядка выше коэффициента молекулярной теплопроводности $k = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$.

3. Получив выражение для коэффициента турбулентной теплопроводности, можно перейти к решению задачи роста льда в пленке.

Уравнения h имеет вид:

$$h = h_0 e^{-t/\tau} + h_y \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (6)$$

где h_0 - начальная толщина пленки. Из (6) видно, что независимо от того $h_0 > h_y$ или $h_0 < h_y$, толщина пленки с течением времени стремится к h_y . Из (5) следует, что h_y есть толщина пленки, которая образуется на поверхности градины за время τ , при остановившемся фронте

кристаллизации . Таким образом, при турбулентном режиме движения пленки градина растет в так называемом мокром режиме под установившейся толщиной пленки. При этом образуется прозрачная однородная структура льда.

Термодинамика роста градин

К настоящему моменту на основе многочисленных теоретических и экспериментальных исследований установлены основные закономерности

образования и роста града. Основным микрофизическим механизмом образования града является гравитационная коагуляция в переохлажденной части облака. Для того чтобы зародыш превратился в крупную градину, необходимо, чтобы переохлажденные капли превратились в ледяные наслоения на зародышах. Рост градины будет определяться разницей между скоростью притока капель и скоростью замерзания капель. Скорость замерзания капель будет определяться из уравнения теплового баланса на поверхности градины.

$$\frac{dh}{dt} = u_* \left(1 - \frac{h_p}{h}\right) \quad (7)$$

Отсюда, если $h_0 > h_p$, то $\frac{dh}{dt} > 0$ и с продвижением фронта кристаллизации dt толщина пленки увеличивается, т.е. скорость притока капель больше скорости продвижения фронта кристаллизации. Если же $h_0 < h_p$, то следует, что с продвижением фронта кристаллизации толщина пленки будет уменьшаться.

Установившуюся толщину пленки h_y найдем из условия $\frac{dh}{dt} = 0$

$$h_y = u * t = \frac{qEV[L_K - c(T_0 - T_\infty)] - 2\lambda_B Nu(T_1 - T_\infty) - 2DShL((\rho_\pi - \rho_\infty))}{4c\rho B' c_x V^2 \Delta T} \quad (8)$$

Решение уравнения (6) имеет вид:

$$h = h_0 e^{-t/\tau} + h_y (1 - e^{-t/\tau}) \quad (9)$$

Из (3.2.34) видно, что независимо от того $h_0 > h_y$ или $h_0 < h_y$, толщина пленки с течением времени стремится к h_y . Таким образом, при турбулентном режиме движения пленки градина растет в мокром режиме под установившейся толщиной пленки. При этом образуется прозрачная однородная структура льда.

3. Анализ структуры градины при использовании равновесной толщины пленки.

3. 1. Расчёт равновесной толщины пленки.

Наблюдаются два качественно различных режима кристаллизации аэрозольного потока на поверхности препятствия. В одном режиме теплопередача в формирующейся на препятствии водяной пленке имеет турбулентный характер; тогда пленка устойчива, под ней растёт лед с максимальной плотностью ($\rho_0=0.92 \text{ г.см}^{-3}$).

В другом режиме теплопередача молекулярная, в таком ламинарном (вязком) режиме пленка оказывается неустойчивой, она исчезает, капли кристаллизуются, не сливаясь воедино, и образуют дискретную структуру меньшей плотности ($\rho < \rho_0$). Определяющим аргументом режима кристаллизации является так называемая равновесная толщина пленки h_p . Для препятствий, характерный размер которых R значительно больше размера капель в обтекающем аэрозольном потоке, толщина пленки

$$h_p = \frac{\lambda_B}{\rho_{л.L} \dot{R}} (T_0 - T_i - a^{-1/b} \dot{R}^{1/b}) = \frac{\lambda_B}{\rho_{л.L} \dot{R}} (T_0 - T_i - 3R^{0.59}) \quad (10)$$

$$\dot{R} = V * \frac{q}{\rho_B} * \frac{\bar{E}}{k\Phi} \quad (11)$$

$$V_R = 0.65. \sqrt{R_{гр} \frac{\rho_{л}}{\rho_{возд}}} \quad (12)$$

$R_{гр}$ —радиус градины, см

$\rho_{\text{л}}$ - плотность льда кг / м³ ;

$\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха кг/м³;

$\lambda_{\text{в}}=4.5 \cdot 10^3$

T_i – температура воздуха в облаке, К

$T_0 = 273.15 \text{ K}$

$L = 3,24051 \cdot 10^{10}$

$q_{\text{в}}$ -Водность в облаке кг/м³;

\dot{R} - скорость поступления воды к препятствию,

$k_{\text{ф}}$ - коэффициент формы препятствия,

$\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{л}}$ - соответственно плотность воды и льда,

$\lambda_{\text{в}}$ - коэффициент теплопроводности воды,

L - теплота кристаллизации воды,

q - водность аэрозоля (масса воды в единице объема аэрозоля),

V - скорость потока относительно препятствия,

\bar{E} - среднеинтегральный коэффициент захвата препятствием аэрозольных частиц,

T_0 и T_1 - соответственно температура стабильной кристаллизации и аэрозольного потока,

a и b - размерные константы, характеризующие линейную скорость кристаллизации (ЛСК) воды (см.С⁻¹) в формуле

$$\text{ЛСК} \sim a (T - T_1)^b = 0.16(T_0 - T)^{0.69} \cdot (2.3.16)$$

Коэффициент формы препятствия, обтекаемого аэрозольным потоком, изменяется в пределах $1 \leq k_{\text{ф}} \leq 4$. Предельное значение $k_{\text{ф}} = 1$ соответствует плоскому препятствию типа крыла самолета; предельное значение $k_{\text{ф}} = 4$ - сфере при равномерном оседании капель по всей ее поверхности; для цилиндра при таком же условии $k_{\text{ф}} = \pi$.

Смена режимов кристаллизации происходит, когда равновесная толщина h_p переходит через критическое значение $h_{\text{кр}} = 0,13 \text{ см}$.

ТАБЛИЦА 3 РАВНОВЕСНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЁНКИ ДЛЯ МЕЛКИХ ГРАДИН.

	R=0,2см		
Температура	q=0,001г.м ⁻³	q=0,005г.м ⁻³	q=0,015г.м ⁻³
t=-5°C	0,0013	0,0008	0,0004
t=-10°C	0,0025	0,0015	0,0007
t=-15°C	0,0037	0,0022	0,0011
t=-20°C	0,0050	0,0030	0,0015
t=-25°C	0,0062	0,0037	0,0019
t=-30°C	0,0074	0,0044	0,0022

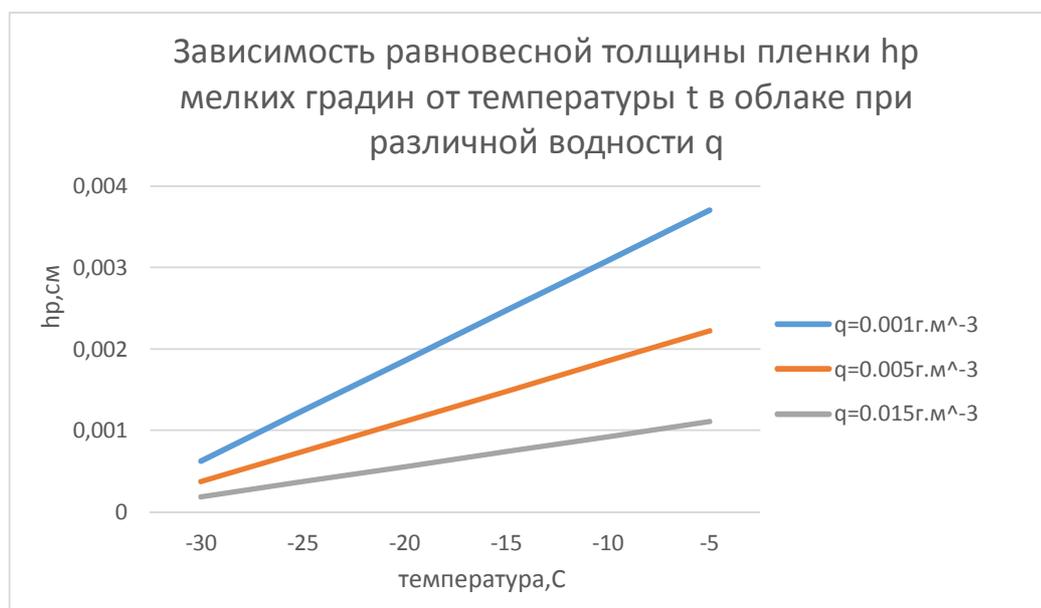


РИСУНОК 10 ЗАВИСИМОСТЬ РАВНОВЕСНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ МЕЛКИХ ГРАДИН ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАКЕ.

Вывод

Равновесная толщина пленки h_p крупных градов от температуры t в облаке меняется при различной влажности q растет все время с увеличением температуры. Она большая при температуре -5°C для всех влажности и маленькая при -30°C . Градины с малинкой влажностью имеют большие значения равновесной толщиной пленки.

На пример, для влажности $0,015 \text{ г/м}^3$ ($0,0004 \text{ см}$) при температуре -5°C она в 3 раза меньше чем у влажности $0,001 \text{ г/м}^3$ ($0,0013 \text{ см}$) тоже при -30°C это отношение сохраняется. значения влажности $0,005 \text{ г/м}^3$ в 3 раза больше чем значения влажности $0,0015 \text{ г/м}^3$. Можем говорить, что чем большее влажности у крупных градин, тем они растут в мокром режиме.

ТАБЛИЦА 4 РАВНОВЕСНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЁНКИ ДЛЯ КРУПНЫХ ГРАДИН.

	R=0,8см		
Температура	q=0,001г.м ⁻³	q=0,005г.м ⁻³	q=0,015г.м ⁻³
t=-5°C	0,0006	0,0004	0,0002
t=-10°C	0,0012	0,0007	0,0004
t=-15°C	0,0019	0,0011	0,0006
t=-20°C	0,0025	0,0015	0,0007
t=-25°C	0,0031	0,0019	0,0009
t=-30°C	0,0037	0,0022	0,0011

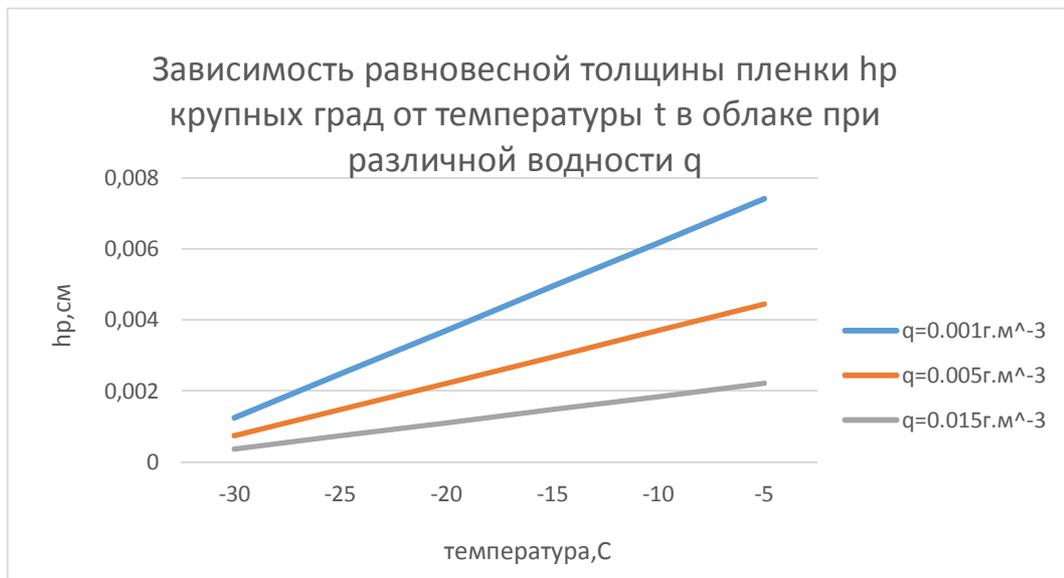


РИСУНОК 11 ЗАВИСИМОСТЬ РАВНОВЕСНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КРУПНЫХ ГРАД ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАКЕ.

Вывод

Равновесная толщина пленки h_r мелких градин от температуры t в облаке растет все время при различной водности q с увеличением температуры. Равновесная толщина больше при температуре -5°C и маленькая при температуре -30°C . Градины с малинкой водностью имеют большой равновесной толщиной пленки.

На пример, для водности $0,015 \text{ г/м}^3$ ($0,002 \text{ см}$) при температуре -5°C она в 3 раза меньше чем у водности $0,001 \text{ г/м}^3$ ($0,008 \text{ см}$) тоже при -30°C это отношение сохраняется $0,0037 \text{ см}$ для $0,001 \text{ г/м}^3$ и $0,0011 \text{ см}$ для $0,015 \text{ г/м}^3$. Значения равновесной толщины при водности $0,005 \text{ г/м}^3$ в 2 раза больше значения равновесной толщины при водности $0,0015 \text{ г/м}^3$ и в 2 раза меньшее значения равновесной толщины при водности $0,001 \text{ г/м}^3$.

Можно выводить, что, чем большее водности мелких градин, тем они растут в мокром режиме.

Зависимость толщина пленки от плотности

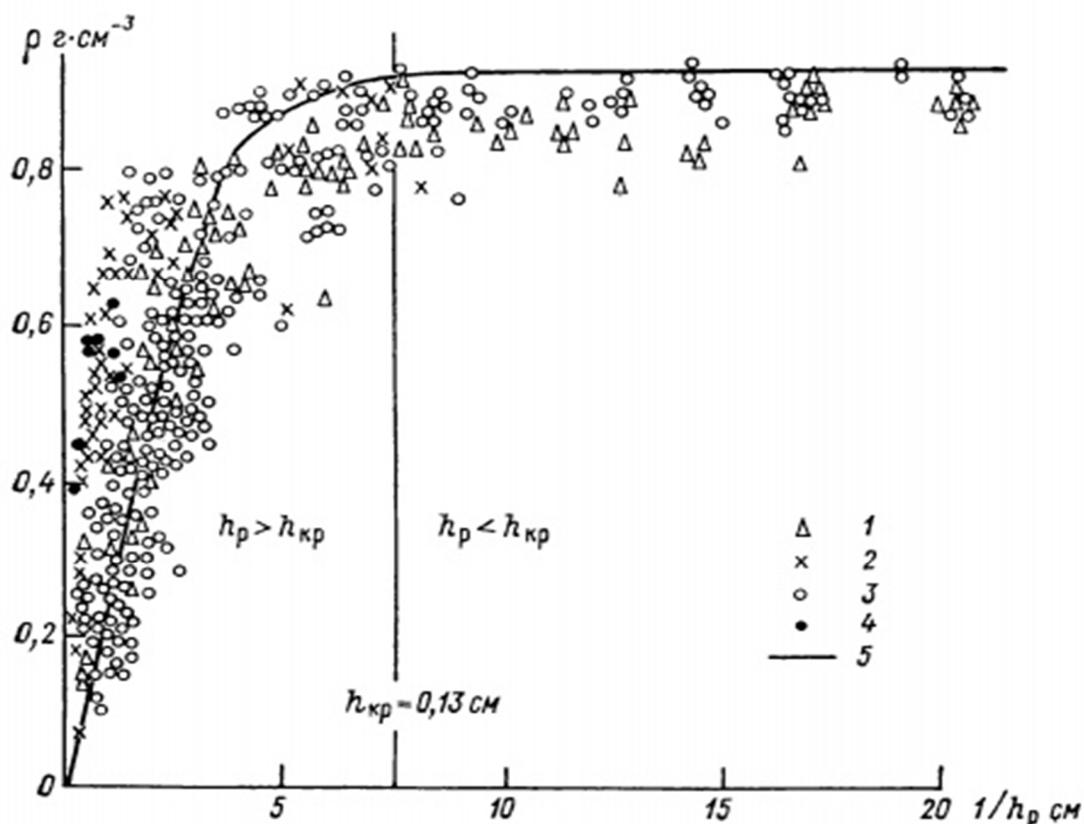


РИСУНОК 12 ПЛОТНОСТЬ СЛОЯ НА ПОДЛОЖКЕ КАК ФУНКЦИЯ h_p .

Плотность града обычно $> 0,8$ г см⁻³ и приближается к твердому льду (0,917 г см⁻³), особенно если во влажном росте - имеет значение режим роста и история (и таяние / замерзание) - внешняя влажная поверхность во время влажного роста или таяния может незначительно увеличить объемную плотность частиц - ранний сухой рост может уменьшить общую объемную плотность - но вода может впитаться в матрицу льда / воздуха и значительно увеличить объемную плотность частиц.

Влияние зародышей града на форму во время роста града •
Отличительный ранний способ роста крупного града говорит о том, что образование зародышей сопровождается аккреционным ростом града

3.2. Расчёт критической водности в облаке

Введем понятие критической водности облака, которая соответствует условиям перехода от сухого к мокрому режиму роста, то есть условиям, когда толщина равновесной пленки равна критическому значению (0,13 см). Формулу для ее расчета можно получить из формулы 10 для равновесной толщины пленки.

ТАБЛИЦА 5 ЗАВИСИМОСТЬ ЗНАЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКАЯ ВОДНОСТИ $q_{кр}$ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ Т ПРИ ПЛОТНОСТЬ ГРАДА $\rho_1 = 0,35 \text{ г. см}^{-3}$ И $\rho_2 = 0,7 \text{ г. см}^{-3}$, ДЛЯ ГРАДИН РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА.

R=0.1C

t(C)	-10	-20	-30	-40
$q_{кр,1}$ (г. м ⁻³)	0.16	0.32	0.48	0.64
$q_{кр,2}$ (г. м ⁻³)	0,08	0,16	0,24	0,32

R=0.2CM

t(C)	-	-	-	-
	10	20	30	40
$q_{кр,1}$ (г. м ⁻³)	0 .11	0 .22	0 .33	0 .44
$q_{кр,2}$ (г. м ⁻³)	0 ,056	0 ,11	0 ,16	0 ,22

R=0.5CM

t(C)	-	-	-	-
-------	---	---	---	---

	10	20	30	40
$q_{кр, 1}(\text{г. м}^{-3})$	0 .07	0 .14	0 .22	0 .28
$q_{кр, 2}(\text{г. м}^{-3})$	0 ,04	0 ,07	0 ,11	0 ,14

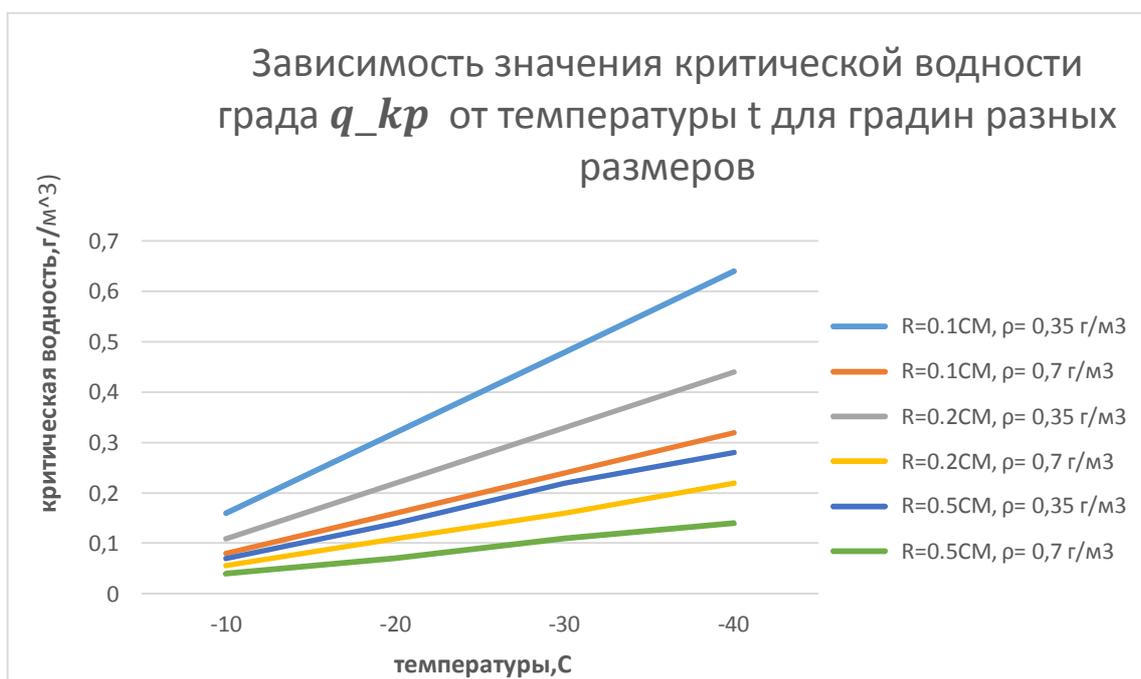


РИСУНОК 13 ЗАВИСИМОСТЬ ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ВОДНОСТИ ГРАДА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Вывод

Значения критической водности в облаке для мелких градин больше, чем для крупных градин. Град растёт в мокром режиме при температуре -10°C и -20°C градусов, а при температуре -40°C, облако, град растёт в мокром режиме.

ТАБЛИЦА 6 ЗАВИСИМОСТЬ ЗНАЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКАЯ ВОДНОСТИ ГРАДА $q_{кр}$, Г/М³ ОТ РАДИУСА ГРАДИНЫ R, СМ ДЛЯ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУР Т.

R,СМ	0,1	0,2	0,5	0,8
T=-10°C	0,08	0,056	0,04	0,028
T=-20°C	0,16	0,11	0,07	0,056
T=30°C	0,24	0,16	0,11	0,085
T=-40°C	0,32	0,22	0,14	0,11

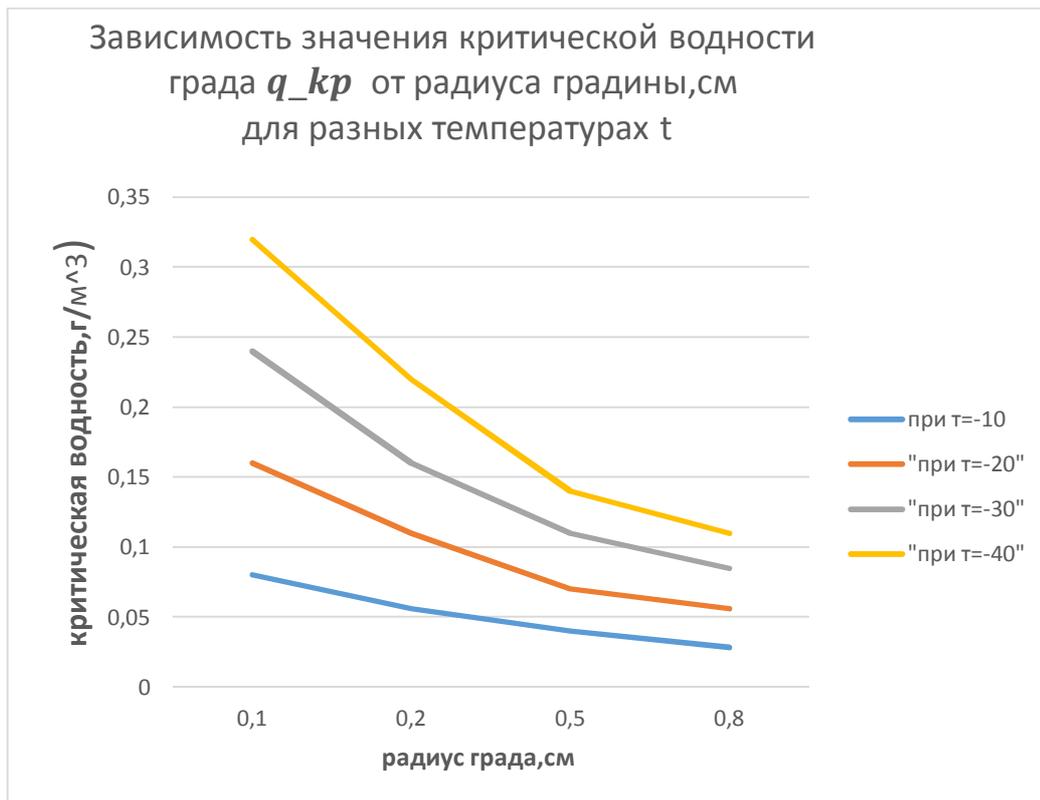


РИСУНОК 14 ЗАВИСИМОСТЬ ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ВОДНОСТИ ГРАДА ОТ РАДИУСА ГРАДИНЫ.

Вывод

Расчёт показали, что крупные градины (0,8 см) растут в мокром режиме все время при разных температурах ($h < h_p$). Таким образом анализ показали, что с увеличением радиуса градина критическая водность уменьшается при сухом режиме.

Представляет интерес анализ реальных условий в атмосфере и кучево-дождевых облаках, при которых происходит переход от сухого к мокрому режиму роста крупы или града. Для этого были использованы данные радиозондирования атмосферы, когда наблюдалась гроза. Был выбран случай сильной грозы с выпадением града, который произошел в 8-ого июня 2019 на станции Воеково. Результаты анализа представлены на рисунке 10. Как видим, у нас были тропические температуры, высота на -10°C (4800 м), -20°C (6000 м) и -30°C (8500 м). уровень тропопаузы 11 км и температура -55°C .

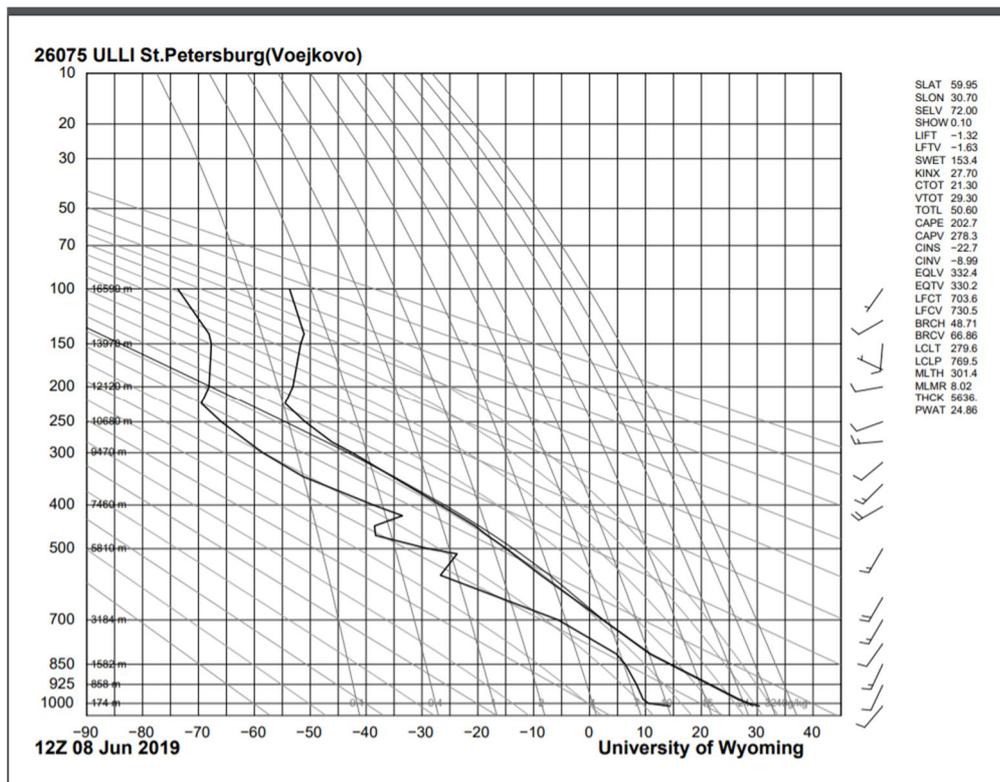


РИСУНОК 15 АЭРОЛОГИЧЕСКИЙ ДИАГРАММ.

Если значения влажности меньше соответствующих, приведенным в таблице 3, градины или крупинки растут в сухом режиме. Если они больше приведенных в таблице 4 значений, - в мокром режиме. Как отмечалось выше, град, растущий в мокром режиме, имеет плотность до $0,92 \text{ кг/м}^3$ и может представлять опасность для объектов хозяйства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе, были рассмотрены условия объясняющих формирования слоистой структуры града. Для этого, анализ существующих теорий роста градин показал, что существуют два различных подхода. Согласно Л.Г. Качуриным было показано, что слоистая структура льда на поверхности предмета, помещенного в поток переохлажденного водного аэрозоля, определяется равновесной толщиной пленки. Другой подход основан на

уравнении теплового баланса на поверхности градины и введении понятия критической водности.

В настоящей работе, выясняется смысл критической равновесной толщины пленки и устанавливается связь между двумя существующими критериями, определяющими переход от сухого режима роста градин к мокрому режиму.

1. Проведенные расчеты показали, что равновесная толщина пленки h_p мелких и крупных градин от температуры t в облаке растет все время при различной водности q с повышением температуры. Градины с малинкой водностью имеют большой равновесной толщиной пленки. Чем большее водности у градин, тем они растут в мокром режиме.

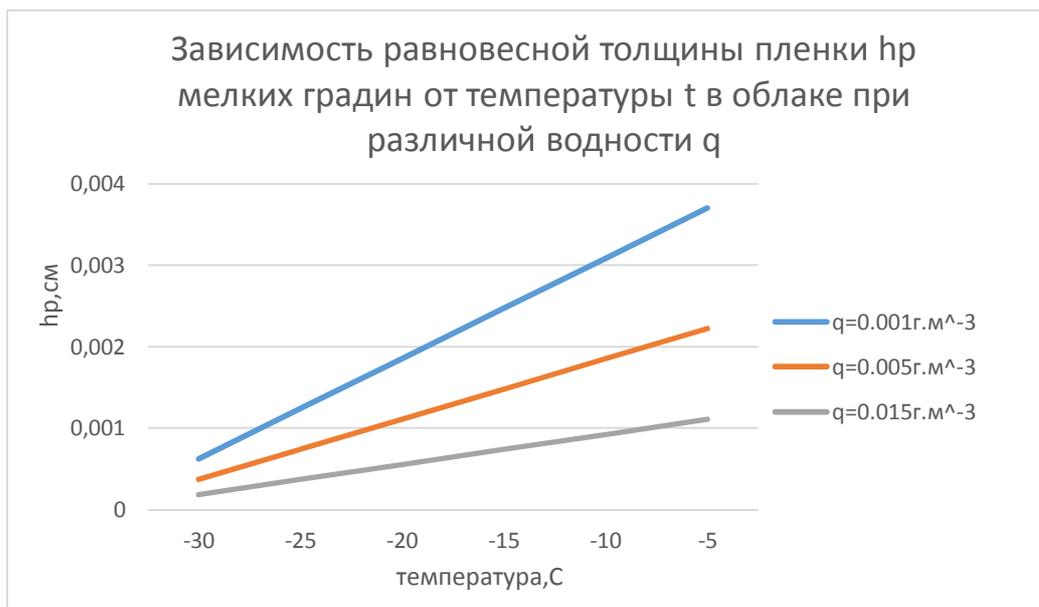


РИСУНОК 16 ЗАВИСИМОСТЬ РАВНОВЕСНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ МЕЛКИХ ГРАДИН ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАКЕ.

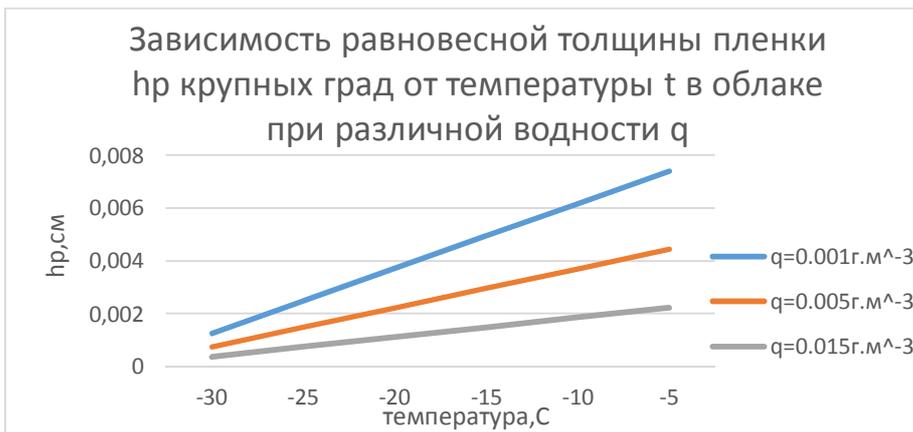


РИСУНОК 17 ЗАВИСИМОСТЬ РАВНОВЕСНОЙ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ КРУПНЫХ ГРАД ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАКЕ.

2. Оценка критической влажности облака, показали, что крупные градины растут в мокром режиме все время при разных температурах ($h < h_p$). Таким образом анализ показали, что с увеличением радиуса градина критическая влажность уменьшается при сухом режиме.

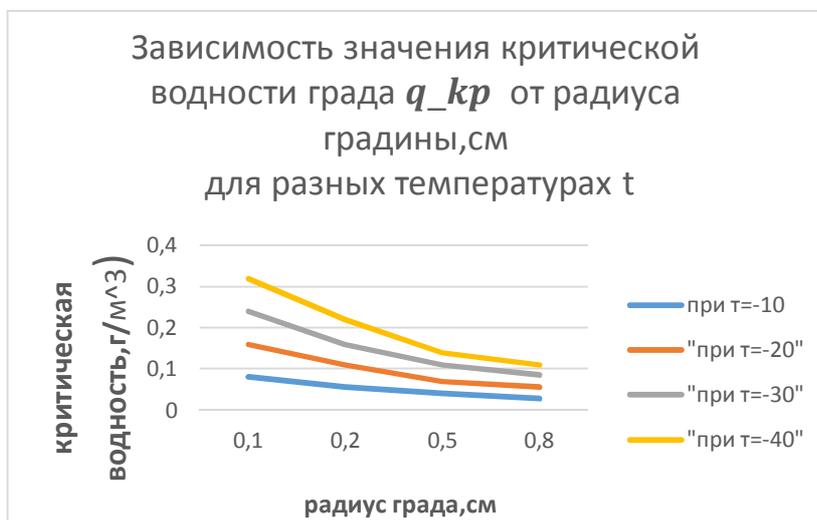


РИСУНОК 18 ЗАВИСИМОСТЬ ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ВОДНОСТИ ГРАДА ОТ РАДИУСА ГРАДИНЫ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Закинян Р.Г. Термодинамика Зарождения И Роста Града.
2. Н. Pruppacher, J. Klett. *Microphysics Of Clouds* (Bookfi.Org)
©2004 Kluwer Academic Publishers.
3. Качурин Л.Г. Физические Основы Воздействия На Атмосферные Процессы. Экспериментальная Физика Атмосферы.
4. [.https://www.persee.fr/doc/geoca_0035-113x_1960_num_35_1_2383](https://www.persee.fr/doc/geoca_0035-113x_1960_num_35_1_2383)
5. https://www.nsstc.uah.edu/data/uahsevere/owles/parsivel/references/graupel_hail_density_lecture.pdf