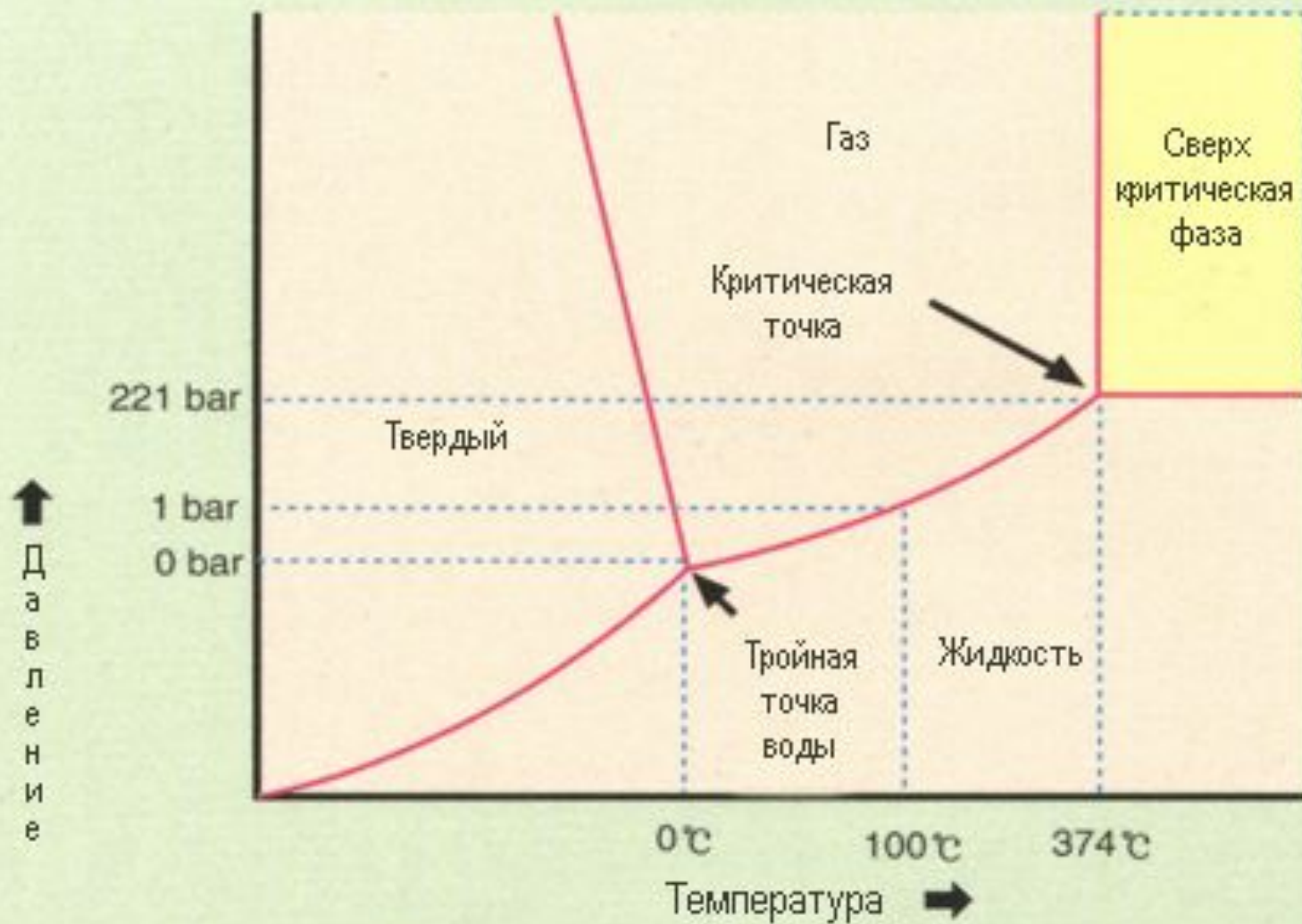


курс

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

Тема 3

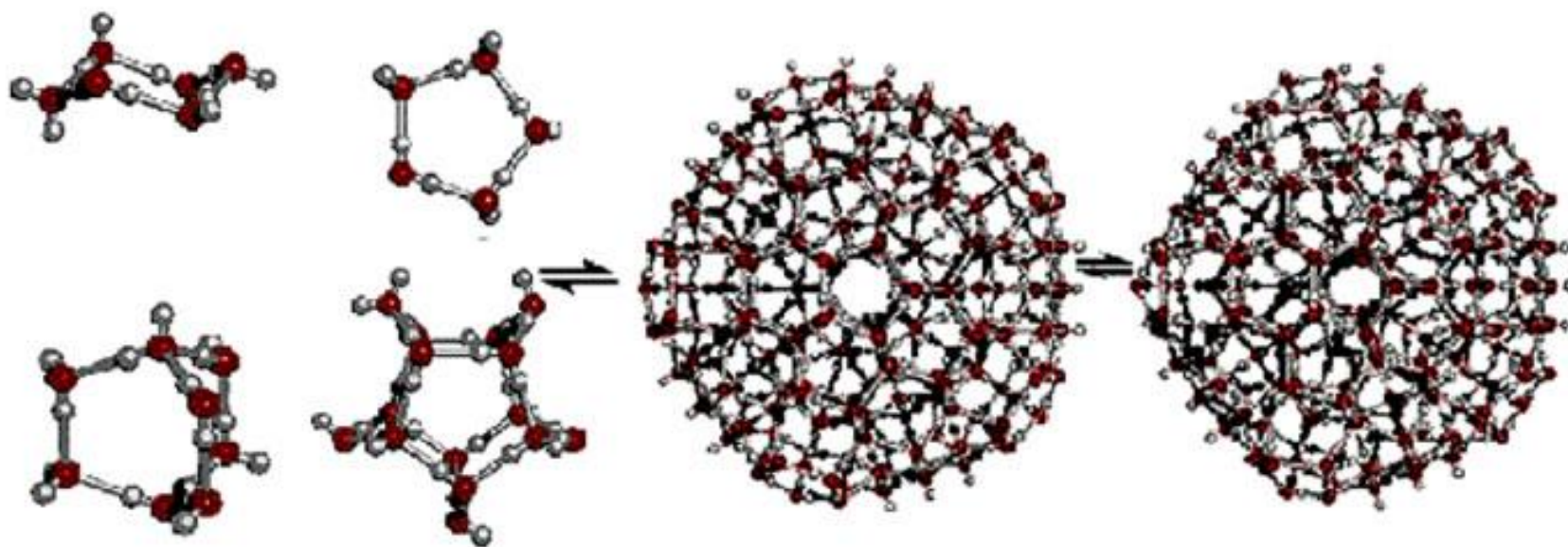
Процесс возникновения зародышевых капель в атмосфере

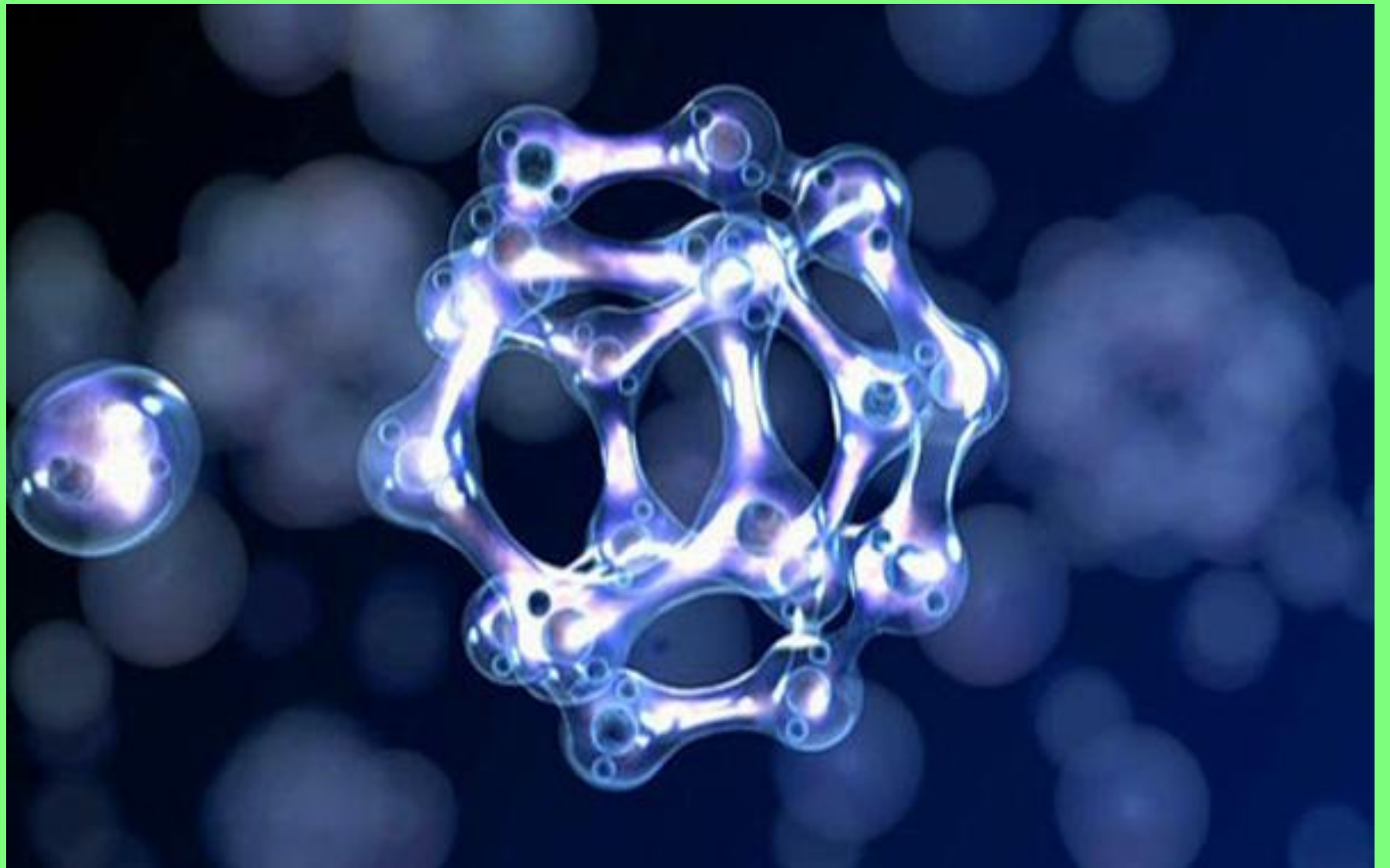


Фазовая диаграмма воды

образование зародыша жидкой фазы

- Самопроизвольное образование зародыша жидкой фазы (зародыша капли) в атмосфере пара - при беспорядочном движении несколько молекул пара одновременно столкнутся и объединятся и в последующем не разойдутся снова, т.е. возникшая капля будет устойчивой.





Из термодинамики известно, что вероятность образования в 1 см^3 в течение 1 с одного зародыша равна

$$\phi = C' \exp\left(-\frac{W}{KT}\right)$$

Где K – постоянная Больцмана; C' - постоянная порядка 10^{25} .
При $E_k/e = 2$, т.е. двукратном пересыщении, образуется один заряд с радиусом порядка $2 \cdot 10^{-7}$ см в каждые 10^{69} с,
при $E_k/e = 4$ – один зародыш в 1 с, а при пятикратном пересыщении – уже 10^8 зародышей в 1 с.

для самопроизвольного образования жидких зародышевых капель нужны весьма значительные пересыщения, никогда не наблюдающиеся в атмосфере в естественных условиях.

ядра конденсации

- Именно поэтому имеет большое значение наличие в атмосфере ядер конденсации. Так называются мельчайшие частицы растворимых и нерастворимых в воде веществ, служащие центрами, на которых начинается процесс конденсации и образования зародышевых капель.
- Если в атмосфере имеются мельчайшие твердые частицы, которые адсорбируют на поверхности молекулы водяного пара, то такие частицы смогут затем играть роль уже готовых зародышевых капель. Каждая пылинка будет служить ядром конденсации.

Нерастворимые ядра конденсации

- К нерастворимым относятся частицы почвы и горных пород, частицы дыма, органических веществ, микроорганизмы и т.п.
- Они всегда присутствуют в большом числе в атмосфере и могут, вероятно, становиться ядрами конденсации.
- Пыль из пустынь, где имеются большие солончаки, содержит большое количество солей.
- Лишь некоторые несмачиваемые жирные вещества не могут играть роль ядер.

растворимые ядра конденсации

- Другой вид ядер конденсации представляет собой растворимые (гигроскопичные) ядра, например, частички какой-либо растворимой соли. Когда такая частица адсорбирует воду, образуется концентрированный раствор, над которым упругость пара мала. На таком ядре, следовательно, капелька может расти даже при низкой относительной влажности воздуха. При росте ее концентрация раствора убывает, и дальнейшее увеличение капли замедляется.
- В атмосфере постоянно имеются окислы серы и частицы морской соли.

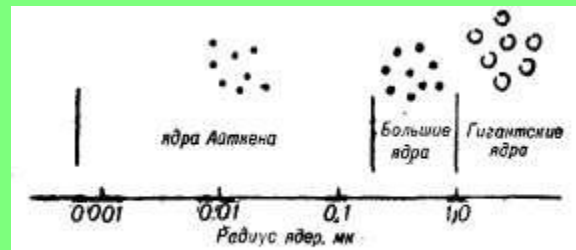


Рис. 1. Три группы ядер конденсации.

происхождение

- Каменный уголь, сжигаемый повсеместно в бесчисленных промышленных и отопительных установках, содержит от 0.3 до 2% серы.
- Сгорая, она образует сернистый газ SO_2 , который при посредстве различных окислителей, например окислов азота, может превращаться в серный ангидрид SO_3 и затем в серную кислоту H_2SO_4 , растворимую и очень гигроскопичную. Оценивая среднее годовое потребление каменного угля на Земном шаре в 10^9 т - в атмосферу таким путем за год попадает около 20 млн.т. сернистого газа.

происхождение

- Уже давно известно, что дождевая вода всегда содержит некоторое количество морской соли – около 3.5 мг хлора на литр воды.
- Морская соль состоит из 77.8% NaCl, 10.9% MgCl₂ и в небольших количествах сернокислых солей магния, калия и кальция. Все они, кроме сернокислого кальция, хорошо растворимы в воде.
- Морская соль содержит 88.7% хлоридов и 10.8% сульфатов.
- Частицы соли могут попадать в атмосферу при испарении брызг морской воды.

Ядра конденсации в атмосфере

- Почти все частицы аэрозоля – твердые или жидкие частицы, взвешенные в воздухе – могут играть роль ядер конденсации.
- Число активных ядер зависит от пересыщения воздуха - в атмосфере или в приборе, в котором наблюдают образование капель воды на ядрах.

Ядра конденсации в атмосфере

- Обычно различают:
- 1) наиболее мелкие «ядра Айткена» ($r < 0.1$ мкм), эффективные при больших пересыщениях воздуха порядка 200%. В атмосфере, при малых пересыщениях они очень редко становятся активными центрами конденсации;
- 2) большие или крупные ядра, называемые иногда метеорологическими или облачными, весьма активные в атмосфере ($r = 0.1 - 1.0$ мкм);
- 3) «гигантские ядра» ($r = 1.0 - 3.5$ мкм) – немногочисленные, но очень важные для образования крупных капель в облаках, вырастающих в капли дождя.

Ядра конденсации в атмосфере

- Среднее число ядер в 1 см^3 вблизи земной поверхности достигает
- в городе 150 000,
- в сельской местности – 9500.
- На побережье моря число ядер очень сильно зависит от направления ветра.
- *Так, на небольшом острове (Аллигатор-риф) у берегов Флориды содержится в 1 см^3 около 5170 ядер при северном ветре с материка и 400 – при восточном ветре с океана.*

Ядра конденсации в атмосфере

- Зимой или в начале весны число ядер вообще несколько больше, чем летом.
- В течение суток число ядер достигает минимума ночью или к моменту восхода Солнца и резко увеличивается днем.
- Ночью, при стихании ветра, ядра оседают с росой или с туманом, днем усиливающийся ветер может поднять частицы твердых веществ с земли и содействовать более далекому распространению ядер от места их происхождения.
- В свободной атмосфере число ядер быстро убывает с высотой.

Ядра конденсации в атмосфере

- Внутри облака число свободных ядер значительно убывает и количество исчезающих ядер в несколько раз больше числа наблюдающихся в том же объеме.
- Поэтому возникновение облаков и осадков ограничивается не дефицитом ядер, а недостаточным влагозапасом атмосферы.

Тема 4

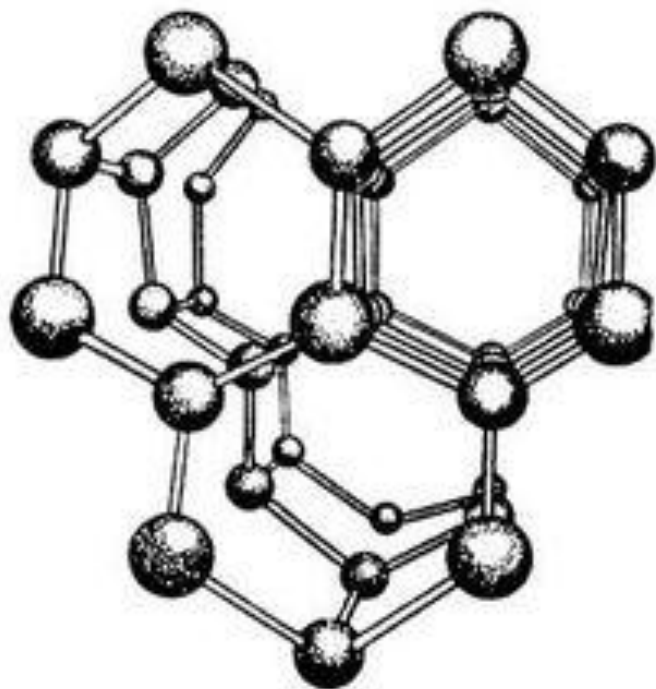
ПРОЦЕССЫ УКРУПНЕНИЯ КАПЕЛЬ И КРИСТАЛЛОВ В ОБЛАКАХ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОСАДКОВ

- Возникающие на ядрах зародышевые капли укрупняются за счет притока водяного пара и превращаются в капли облаков или туманов. Размеры облачных капель (1-15 мкм) малы и даже сравнительно медленные восходящие потоки удерживают их во взвешенном состоянии.
- Для того, чтобы преодолеть восходящие потоки, облачная капля должна вырасти до размеров 50-100 мкм, т.е. радиус капли должен увеличиться более чем в 10 раз.
- Такое укрупнение облачных частиц осуществляется двумя физическими механизмами: конденсацией (сублимацией) пара и коагуляцией – укрупнением за счет слияния капель.
- Оба эти процесса существенно зависят не только от термодинамических условий влажного воздуха, но и от микроструктуры облаков. Поэтому остановимся кратко на тех параметрах облака, которые объясняются понятием «микроструктура».

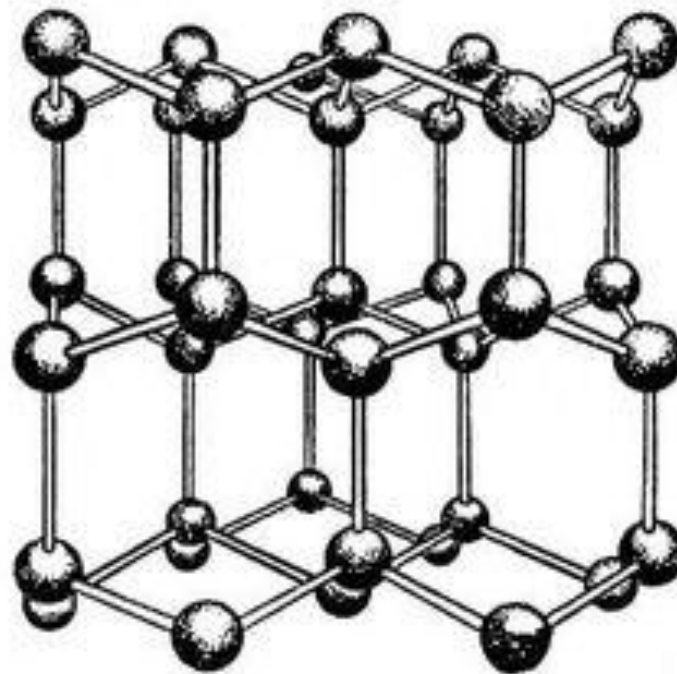
Микроструктура облаков

Фазовый состав

- Облака состоят из мелких капель воды или ледяных кристаллов.
- различают облака водяные и ледяные.
- Так как в облаках капли часто переохлаждены, то бывают и смешанные облака, в которых есть и капли и кристаллы.
- внешний вид, и процессы развития облаков, а также осадки из них существенно зависят от того, имеются ли в облаках ледяные частицы.



вода



лёд

Виды молекулярной связи

Размеры облачных капель и кристаллов

Водяные облака состоят из капель радиусом от 1 до 100 мкм, однако, наиболее часто радиус составляет от 4 до 25 мкм.

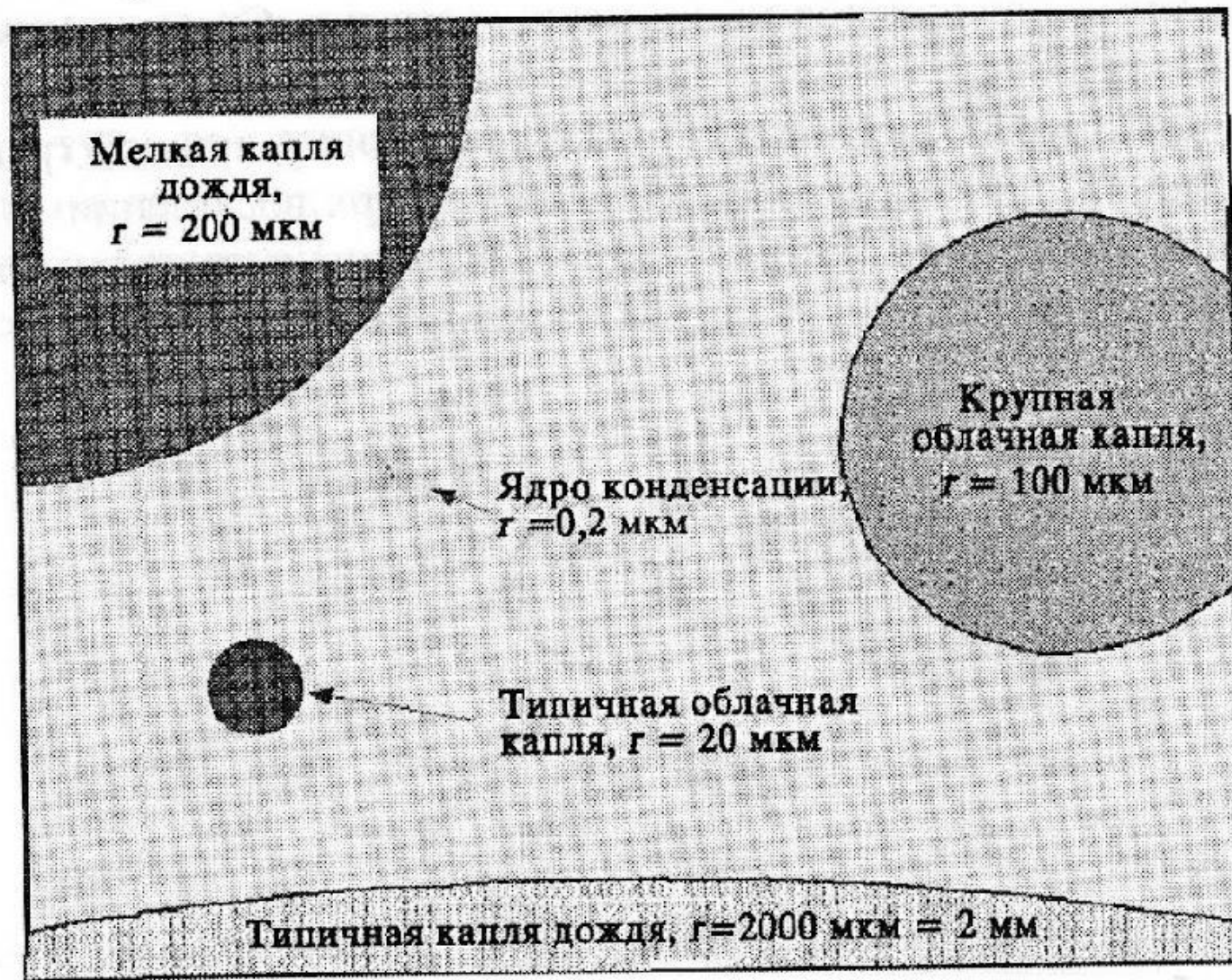
Средний радиус капель не очень сильно зависит от формы облаков и по многочисленным измерениям А.М.Боровикова и И.П.Мазина равен

5.1 мкм для слоистых облаков

5.0 мкм для слоисто-кучевых

5.2 мкм для слоисто-дождевых

4.9 мкм для высоко-кучевых облаков.



с.26. Характерные размеры ядер конденсации, облачных и дождевых капель.

Размеры облачных капель и кристаллов

- Наиболее мелкие и однородные капли ($r_{cp} = 4.0 + 4.5$ мкм) наблюдаются в нижней части облаков St,
- более широкий спектр более крупных капель – в верхней части слоя Сб.
- В кучевых облаках по наблюдениям И.И.Честной и В.И.Зайцева, наиболее крупные капли – в верхней и центральной части облака, а наиболее мелкие – у его основания.

Размеры облачных капель и кристаллов

- Водяные облака содержат обычно от 100 до 600 капель в 1 см^3 , так что среднее расстояние между каплями порядка 1-2 мм. Лишь в очень мелкокапельных слоистых облаках наблюдалось свыше 1400 капель в 1 см^3 .
- В ледяных облаках кристаллы зарождаются при очень низких температурах, но, увеличиваясь, могут выпадать и существовать в более теплых низких слоях облаков.

Существует два основных вида первичных кристаллов:

- Столбики – шестигранные призмы, наблюдающиеся при сравнительно низких температурах от -15 до -30 °С. Длина столбиков достигает $0.1 - 0.3$ мм. Наиболее часто эта форма льдинок наблюдается в перистых облаках;
- Мелкие тонкие или толстые шестиугольные пластинки размером 0.4 мм и толщиной до 100 мкм. Эта форма чаще возникает при медленной сублимации при температурах от -4 до -18 °С.

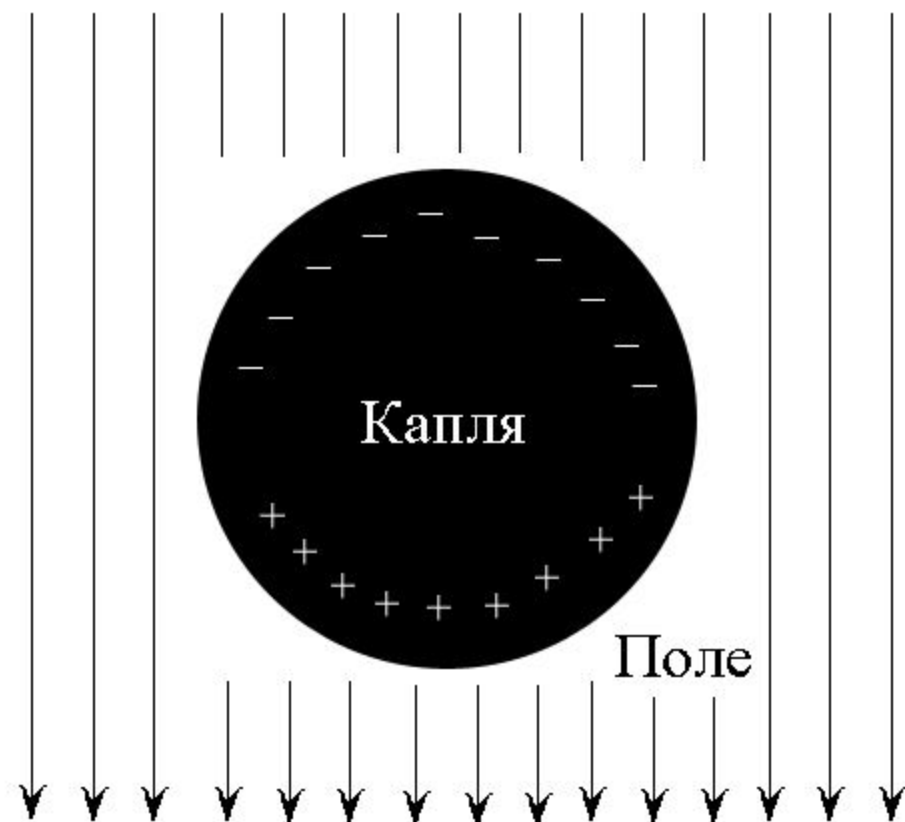
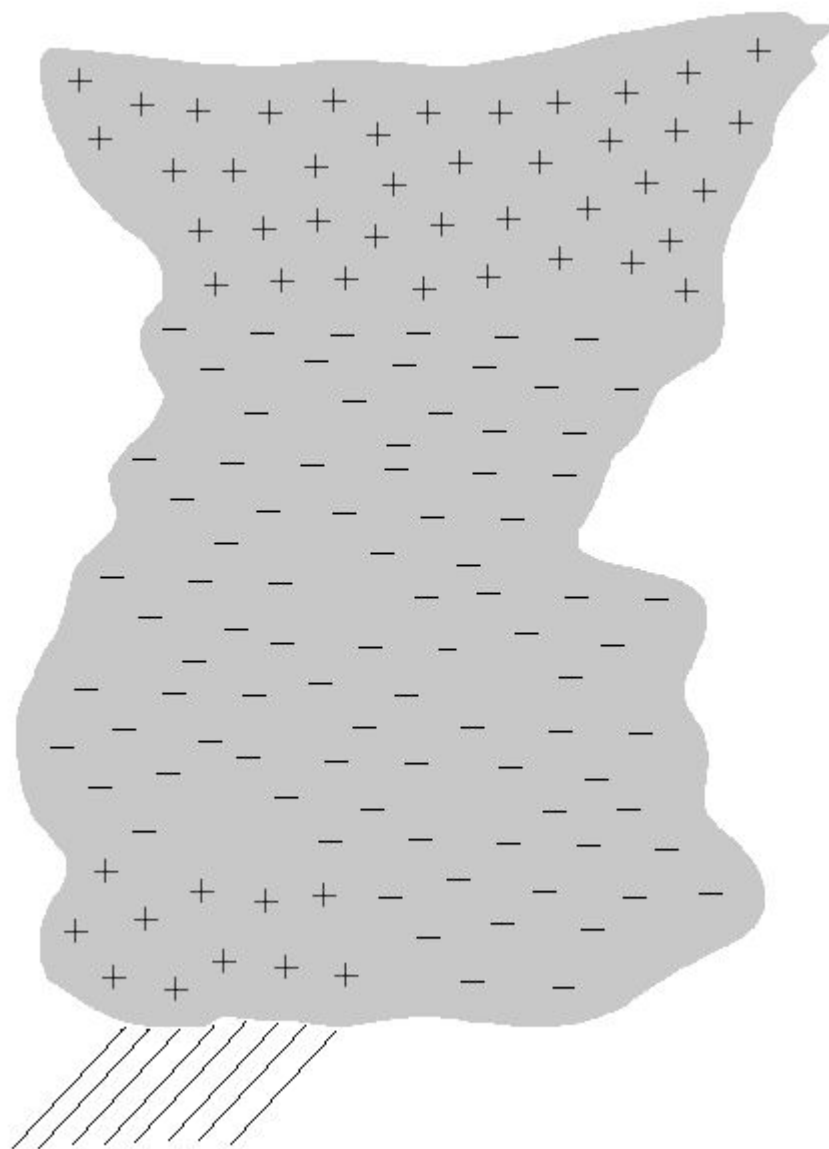
Водность облаков

- Водностью облаков и туманов называют количество воды (в виде капель или кристаллов), содержащееся в единице объема облака.
- Водность измеряется в г/м^3 .

Формы облаков	Температура, градусы		
	-20, -15	-10, -15	+5, +10
St,Ac,Sc	0.13	0.18	0.33
Ns - As	0.14	0.17	0.32

Водность облаков

- Содержание капельно-жидкой воды в облаках почти всегда гораздо меньше, чем парообразной.
- Наибольшая наблюдавшаяся
- в слоисто-дождевых облаках водность достигла 1.68 г/м^3 ,
- в ливневых облаках – 5.4 г/м^3 . По некоторым данным, в облаках Сб водность, изредка достигает 40 г/м^3 .
- В ледяных облаках (в том числе перистых) водность мала и в среднем равна
 - около 0.03 г/м^3 при $-15, -20^\circ$ и
 - 0.006 г/м^3 при температуре ниже -30°C .



Конденсационный рост капель

- Для формирования осадков необходимо укрупнение облачных капель, начальным механизмом которого является конденсация пара на поверхности капли.
- Главным условием конденсации пара служит пересыщение пара по отношению к поверхности капли, т.е. фактическое давление пара в воздухе должно быть больше давления насыщения над поверхностью капли.

Конденсационный рост капель

- Простейшее количественное описание процесса конденсационного роста сводится к следующему.
- Рассмотрим одиночную каплю радиусом r_k , в окрестностях которой водяной пар не возникает и не затрачивается на конденсацию других капель.

Конденсационный рост капель

- Тогда поток пара в капле W на произвольное расстояние r от ее центра можно представить в виде:

$$W = 4\pi r^2 D \frac{da}{dr}$$

Конденсационный рост капель

- Поступая на каплю, поток пара затрачивается на увеличение ее массы:

$$W = \frac{dm}{dt} = \frac{d\left(\frac{4}{3}\pi r_l^3 \rho_l\right)}{dt} = 4\pi r_l^2 \rho_l \frac{dr_l}{dt}$$

Конденсационный рост капель

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D(a - a_k)}{\rho_k r_k}$$

- уравнение Максвелла-Средневского, отражает две главные особенности процесса конденсационного роста капли

Конденсационный рост капель

- Скорость укрупнения пропорциональна пересыщению пара в воздухе по отношению к поверхности капли.
- именно пересыщение служит первопричиной диффузии пара к капле.
- Разность абсолютных влажностей пропорциональна разности между упругостью пара в воздухе и упругостью насыщения над каплей: $(e - E_k)$.
- Поэтому все факторы, определяющие упругость насыщения над каплей (фазовый состав, кривизна, примеси и электрический заряд) влияют и на скорость ее конденсационного роста.

Конденсационный рост капель

- Наиболее существенным фактором является различие в пересыщениях относительно воды и льда. Расчеты показывают, что при наблюдаемых в атмосфере условиях пересыщения относительно льдинок примерно в 20 раз больше, чем по отношению к поверхности капель. Поэтому в ледяных облаках возникновение осадков гораздо более вероятно, чем в водяных;

Конденсационный рост капель

- Скорость конденсационного роста обратно пропорциональна радиусу капли. Это положение не очевидно и является следствием уравнения Максвелла-Средневского. Такая зависимость показывает, что с ростом капли дальнейшая скорость ее укрупнения уменьшается. Наблюдения показывают, что при радиусе 15-20 мкм конденсационный рост практически прекращается, поэтому он может определять формирование лишь мелкокапельных облаков и морозящих осадков.

Конденсационный рост капель

- Формула позволяет определить еще одну важную характеристику конденсационного роста – время укрупнения капли от размера r_1 до r_2 .

$$t = \frac{\rho_k r^2}{2D(a_k - a)}$$

Конденсационный рост капель

- Расчет по этой формуле показывает, что, например, при температуре $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 90% облачные капли радиусами 1 мкм, 10 мкм и 30 мкм испаряются за время 0.06, 6.0 и 60 с соответственно.
- Капли осадков радиусом 100 мкм и 300 мкм испаряются соответственно за время 10 мин и 92 мин.
- если облако состоит из капель радиусом 20-50 мкм, то из него осадки выпадать не могут, так как время их испарения меньше времени падения до земли.
- Если же капли в облаке укрупняются до 100 мкм и более, то они свободно проходят значительные расстояния до земли, не изменяя существенно своего размера.

коагуляция

- Броуновская
- Гидродинамическая
- Электрическая
- Гравитационная

Скорость падения капель дождя

Радиус капли, см	Скорость, м/с
0.005	0.27
0.01	0.72
0.04	3.27
0.08	5.65
0.14	7.85
0.20	8.83
0.28	10.16

- Наблюдения показывают, что в атмосфере могут существовать капли не более 7 мм в диаметре. Максимальная скорость их падения составляет 8-9 м/с; капли больших размеров с большими скоростями разбрызгиваются.
- Твердые частицы осадков в силу меньшей плотности льда и большой поверхности падают гораздо медленнее, чем капли. Так, игольчатые кристаллы длиной 1.5 мм падают со скоростью 0.5 м/с, плоские снежинки размером 3.3 мм имеют скорость падения 0.3 м/с. Ледяная крупа размером 2-3 мм выпадает со скоростью 1.8 м/с.
- Особое место по размерам и скорости падения принадлежит граду. В умеренных широтах наиболее часто градины имеют диаметр от 5 до 2.5. мм; самые крупные из них падают со скоростью 20-25 м/с.

Скорость укрупнения капли при гравитационной коагуляции

- Рассмотрим выводы этой теории в простейшем изложении, когда одна крупная капля радиуса R падает в среде мелких, имеющих одинаковый радиус r .

- Если скорость падения крупной и мелкой каплей соответственно равны V_R , V_r , то за единицу времени крупная капля столкнется со всеми мелкими, которые находятся в цилиндре высотой $(V_R - V_r)$ и радиусом основания $(R + r)$. Масса мелких каплей, содержащихся в единице объема, есть водность облака W .

- Поэтому прирост массы крупной капли выразится как произведение объема цилиндра, «вырезанного» ею из облака, на водность облака:

$$\frac{dM}{dt} = \pi(R + r)^2 (V_R - V_r) w$$

скорость роста капли
определится выражением:

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_k R^3$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{(R + r)^2 (V_R - V_r)}{4 \rho_k R^2} w$$

- Не все столкновения приводят к слиянию капель. Часть капель отскакивает друг от друга как воздушные шары. Отношение числа слившихся капель к числу столкнувшихся называют коэффициентом слияния. В строгой теории коэффициент слияния нужно учитывать в виде множителя в правой части уравнения. Однако, как показали исследования Н.П.Тверской, при типичных для облаков условиях температуры и влажности коэффициент слияния всегда близок к единице;
- В связи с аэродинамическим обтеканием крупной капли встреченным потоком воздуха с ней сталкиваются не все капли, находящиеся в цилиндре радиуса $(R + r)$, а гораздо меньшее их число из некоторой эффективной площади S .

- Отношение S к площади основания цилиндра: называется коэффициентом соударения или коэффициентом захвата .
- Коэффициент соударения по-другому можно определить как соотношение числа мелких капель, фактически столкнувшихся с крупной, к числу мелких капель, которые столкнулись бы с крупной, если бы не было эффекта обтекания. Очевидно, что коэффициент соударения изменяется от нуля до единицы и в значительной мере определяет процесс гравитационной коагуляции.

два фактора гравитационной коагуляции

- Скорость укрупнения прямо зависит от водности облака.
- при данном радиусе мелких капель их концентрация (а, значит, и запас воды для роста крупных капель) определяется водностью облака

два фактора гравитационной коагуляции

- Скорость роста пропорциональна квадрату радиуса крупной капли.
- такой вывод следует, если учесть, что скорость падения пропорциональна квадрату радиуса.
- Такая квадратичная зависимость скорости роста от радиуса капли имеет фундаментальное значение для процесса осадкообразования.

- конденсационный рост - ослабевает по мере укрупнения капли,
- скорость гравитационной коагуляции лавинообразно увеличивается с ростом капли.
- при радиусах капель 20-30 мкм конденсационный рост сильно замедляется, а при малых пересыщениях прекращается вообще.

Однако,

- если облачная капля укрупнилась до 20 мкм, начинается ее интенсивный рост за счет коагуляции.
- При этом коагуляция существенно зависит от радиуса ИСХОДНЫХ капель.
- Например, крупная капля с радиусом 60 мкм увеличивается в среде капель со средним радиусом **6 мкм** в 1.5 раза быстрее, чем при каплях радиусом **4 мкм**.

- интенсивность коагуляционного роста существенно зависит от вертикальной скорости в облаке.
- Чем больше скорость восходящих потоков, тем более крупные капли выпадают в виде осадков.
- Существуют и другие эффекты влияния термодинамических условий на процессы укрупнения облачных частиц.

- Наблюдения показывают, что дождевые капли редко вырастают до таких размеров, при которых их эквивалентный радиус превышает 3 мм. Дело в том, что крупные капли становятся неустойчивыми и разрушаются, разбрызгиваются (при аналогичных условиях градины достигают размеров в несколько сантиметров).



1,35

1,75

2,65

2,90

3,68

4,00

Формы дождевых
капель различного
размера, взвешенных в
воздушном потоке в
аэродинамической
трубе.

(Цифры означают
эквивалентный радиус
в мм)

- Видно, что мелкие капли при падении относительно воздуха сохраняют сферическую форму: сила поверхностного натяжения превышает деформирующую силу аэродинамического сопротивления (вязкости). С увеличением размера соотношение между силами становится обратным. Капля сплющивается, в ее лобовой части появляется углубление, капля приобретает форму перевернутой чашки. В турбулизированной среде форма капли непрерывно меняется. Вода "переливается" и капля—чашка под действием пульсации скорости раздувается как мыльный пузырь и лопаются.

- Разбрызгивание капли может происходить также в результате столкновения и временного слияния ее с другими облачными каплями. Вероятность разбрызгивания зависит от размеров сталкивающихся капель и геометрии столкновения (прямой или касательный удары). Хотя с небольшой вероятностью могут разбрызгиваться капли радиусом $1 \dots 2$ мм, при расчетах в качестве критического размера принимают эквивалентный радиус 0.1 мм. При разбрызгивании крупной капли образуется целый спектр капель: несколько сравнительно крупных и десятки и даже сотни мелких. Масса всех осколков равна массе разбрызгиваемой капли.