



National Research  
**Tomsk  
State  
University**

# Метеорологические величины

*Чередыко  
Наталья Николаевна*

*кандидат географических наук  
доцент кафедры метеорологии и  
климатологии  
геолого-географический факультет*

*atnik3@rambler.ru*



1. Распределение метеорологических элементов в пространстве называют...  
*а. эквискалярной поверхностью б. полем в. градиентом*
2. При какой температуре происходит полное прекращение теплового хаотического движения молекул ? *а. 0 °С б. -100 °С в. 0 °К*
3. Какова средняя температура тропосферы?
4. Изменения температуры и давления, связанные с вращением Земли вокруг своей оси, называют.... *а. суточный ход б. годовой ход в. градиент*
5. При одинаковом значении солнечной радиации летом и днем температура воздуха над сушей будет... *а. выше, чем над морем б. ниже, чем над морем*
6. По мере продвижения в глубь Евразии с запада на восток наблюдается...  
*а. рост летних и падение зимних  $T$ , убывание средней годовой  $T$ , возрастание годовой амплитуды  
б. рост летних и зимних  $T$ , рост средней годовой  $T$ , уменьшение годовой амплитуды  $T$*
7. Метеорологический градиент - вектор, направленный по нормали к поверхности равного значения скалярной метеорологической величины в сторону её... *а. ... возрастания б. ... убывания*
8. Чем ближе изотермы друг к другу, тем градиент ... *а. больше б. меньше в. более изменчив*
9. Кто впервые подтвердил экспериментально, что воздух имеет вес?  
*а. Паскаль б. Торричелли в. Архимед*
10. Наиболее отчетливо суточный ход давления наблюдается ...  
*а. в умеренных широтах б. в тропической зоне в. на экваторе*
11. Половина массы атмосферы сосредоточена в нижнем ее слое до высоты около ...  
*а. 5,5 км б. 30 км в. 25 км*
12. Средний вертикальный градиент атмосферного давления составляет ...  
*а. 15.4 гПа/100 м б. 12.4 гПа/100 м в. 8 гПа/100 м*
13. При средних условиях барическая ступень составляет ...  
*а. 12.4 м/гПа б. 8 гПа/100 м в. 8 м/гПа*

## **Метеорологическая величина –**

количественная характеристика физического состояния атмосферы:  
атмосферное давление, температура,  
влажность, скорость и направление ветра, количество и интенсивность осадков,  
облачность, метеорологическая дальность видимости.

## **Атмосферное явление –**

это физический процесс, сопровождающийся резким (качественным) изменением состояния атмосферы  
# туман гроза гололед пыльная (песчаная) буря шквал метель  
изморозь, роса, иней, осадки, облака, полярные сияния и др

### План занятия:

- Влажность как важнейшая характеристика состояния атмосферы
- Физические и химические свойства воды
- Гигрометрические характеристики
- Методы измерения влажности воздуха
- Испарение и конденсация
- Влагооборот
- Биоклиматическое значение влажности воздуха

## ***Метеорологический элемент –***

обобщающее название атмосферных явлений, характеристик состояния атмосферы и метеорологических величин

**Метеорологическая величина** – количественная характеристика физического состояния атмосферы: атмосферное давление, температура, влажность, скорость и направление ветра, облачность, метеорологическая дальность видимости.

### **План рассмотрения любой метеорологической величины**

1. Определение метеорологической величины
2. Единица измерения
3. Прибор для измеряемых метеорологических величин, формула расчёта для неизмеряемых метеорологических величин
4. Среднее значение, стандарт
5. Экстремальные значения
6. Изменение метеорологической величины во времени
  - а. Периодические (#год и сутки)
  - б. Непериодические (не связаны с годовым и суточными изменениями)
7. Изменение метеорологической величины в пространстве
8. Взаимодействие данной метеорологической величины с другими метеовеличинами и атмосферными явлениями
9. Влияние метеовеличины на растения, животный мир, человека и его жизнедеятельность

Вода занимает около 70,8% поверхности Земли  
Живые организмы содержат 50-99,7% воды.

В атмосфере находится ок. 13-15 тыс. куб. км  
воды.

!! Три агрегатных состояния воды в атмосфере

Водяного пара - в среднем  $1,24 \cdot 10^{16}$  кг,  
< 1 % от общ массы атмосферы,  
!! НО влияние на погоду, климат,  
самочувствие людей очень велико.

## Главный источник водяного пара в атмосфере

– испарение воды с поверхности океанов, морей,  
водоёмов, влажной почвы, растений.

С п/п за год испаряется свыше 500 000 км<sup>3</sup> воды  
(количество воды, почти равное количеству воды в Чёрном море).

В атмосфере под влиянием различных процессов  
водяной пар конденсируется.

При этом образуются облака, туман, осадки, роса.

При таянии и испарении энергия поглощается,  
а при конденсации и сублимации — выделяется

При конденсации влаги выделяется количество  
теплоты.



Фазовые переходы:

твёрдое (лёд) - жидкое (вода) =  
таяние;

жидкое (вода) - пар (газообразное) =  
испарение;

пар (газообразное) - вода (жидкое) =  
конденсация;

твёрдое (лёд) - газообразное (пар) =  
сублимация.

**Цикл круговорот энергии**





## Физические и химические свойства

### ВОДЫ

Вода (окись водорода,  $H_2O$ ) — соединение водорода

с кислородом, **устойчивое** в обычных условиях.

Молекулярная масса воды (18,016 а.е.м.)

распределяется: водород — 11,9%, кислород —

88,81%.



**Свойства воды** определяются особенностями ее строения:

- \* **Биполярность** молекулы воды.
- \* **Сильная водородная** связь – большая теплоемкость воды - регулятор температуры (сглаживает за счёт своей большой теплоёмкости резкие колебания температуры). После плавления льда теплоёмкость увеличивается в 2 раза.
- \* Очень **высокая** теплота парообразования:  $2500 \text{ кДж/кг} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$
- \* Единственное вещество на планете, которое в обычных условиях температуры и давления может находиться **в трёх агрегатных состояниях**.
- \* **Расширяется** при замерзании, **аномалия в области температур от 0 до 4°C**, при 4°C имеет наибольшую плотность, плотность льда меньше плотности воды, скачок плотности при плавлении льда аномален по знаку и по величине.
- \* **Высокое поверхностное натяжение** (0,073 Н/м при температуре 20°C), вода всегда стремится сократить свою поверхность.
- \* Может быть **в жидком переохлаждённом** состоянии при  $T$  ниже точки замерзания, по мере переохлаждения плотность воды сильно уменьшается и приближается к плотности льда.
- \* Является одним из самых универсальных **растворителей**.

# Влажность воздуха - содержание водяного пара в воздухе

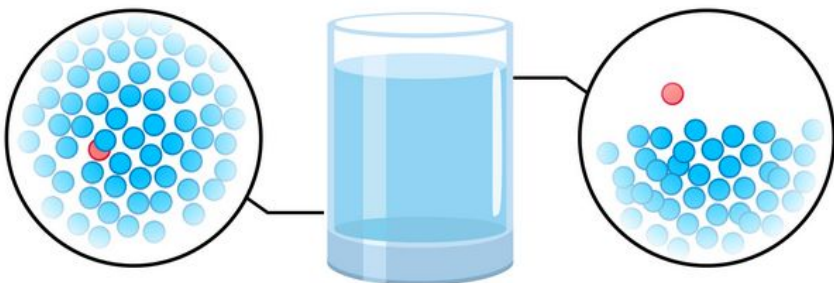
- ✓ Воздух может быть сухой и влажный в зависимости от количества в.п., находящегося при данной температуре в атмосфере
- ✓ В.п. непрерывно поступает в атмосферу путём испарения с водных поверхностей и влажной почвы, а также в результате транспирации
- ✓ От п/п в.п. распространяется вверх, а воздушными течениями переносится из одних мест Земли в другие
- ✓ С в.п. и его фазовыми переходами связаны важнейшие процессы погодо- и климатообразования
- ✓ В.п. – это газ без цвета, запаха и вкуса
- ✓ В.п. – это переменная составляющая атмосферного воздуха

Для количественного выражения содержания водяного пара в атмосфере используют различные характеристики влажности воздуха - **гигрометрические характеристики**



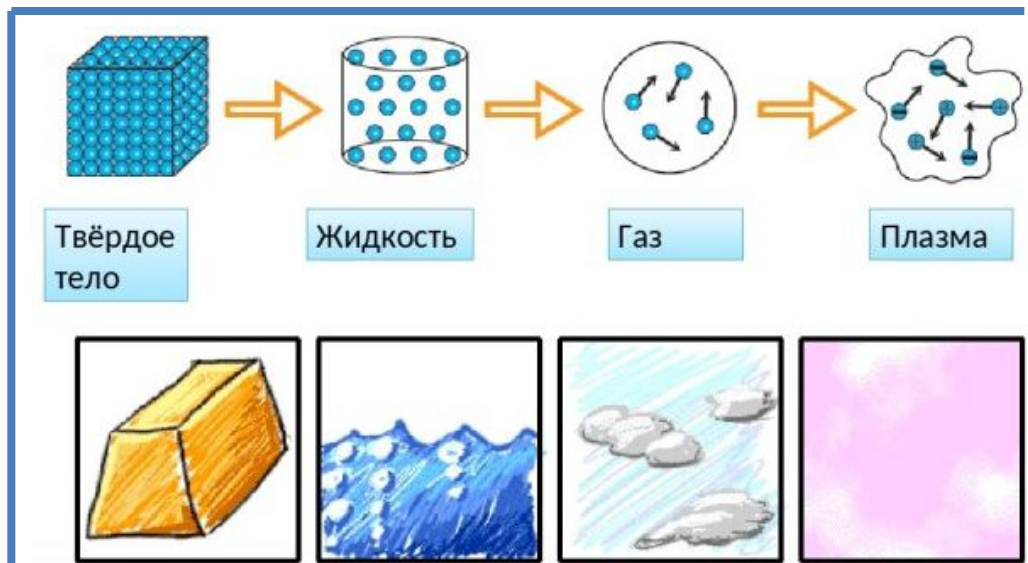
## Испарение

- ◇ при любой температуре
- ◇ с поверхности жидкости

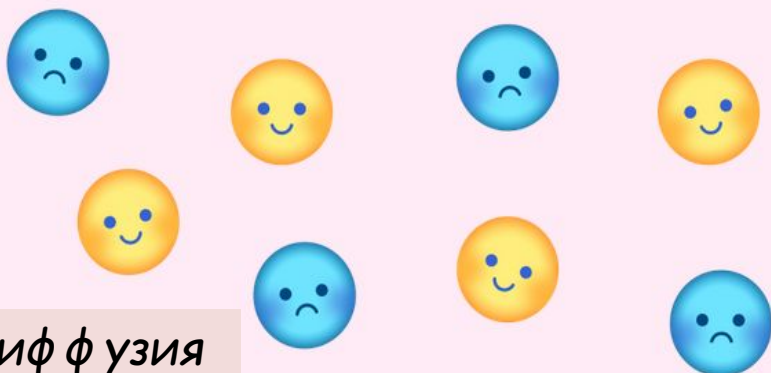


## Кипение

- ◇ при определенной температуре
- ◇ с поверхности жидкости



## Диффузия



- ...  
✓ кровообращение;
  - ✓ питание;
  - ✓ растворение веществ в жидкости;
  - ✓ неоднородность воздуха;
  - ✓ распространение запахов
- ...

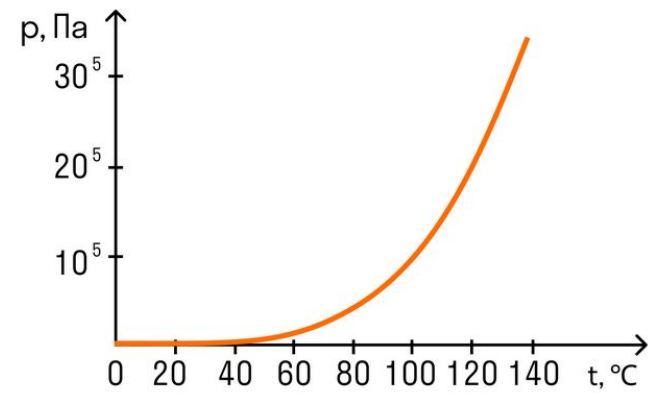


### Испарение

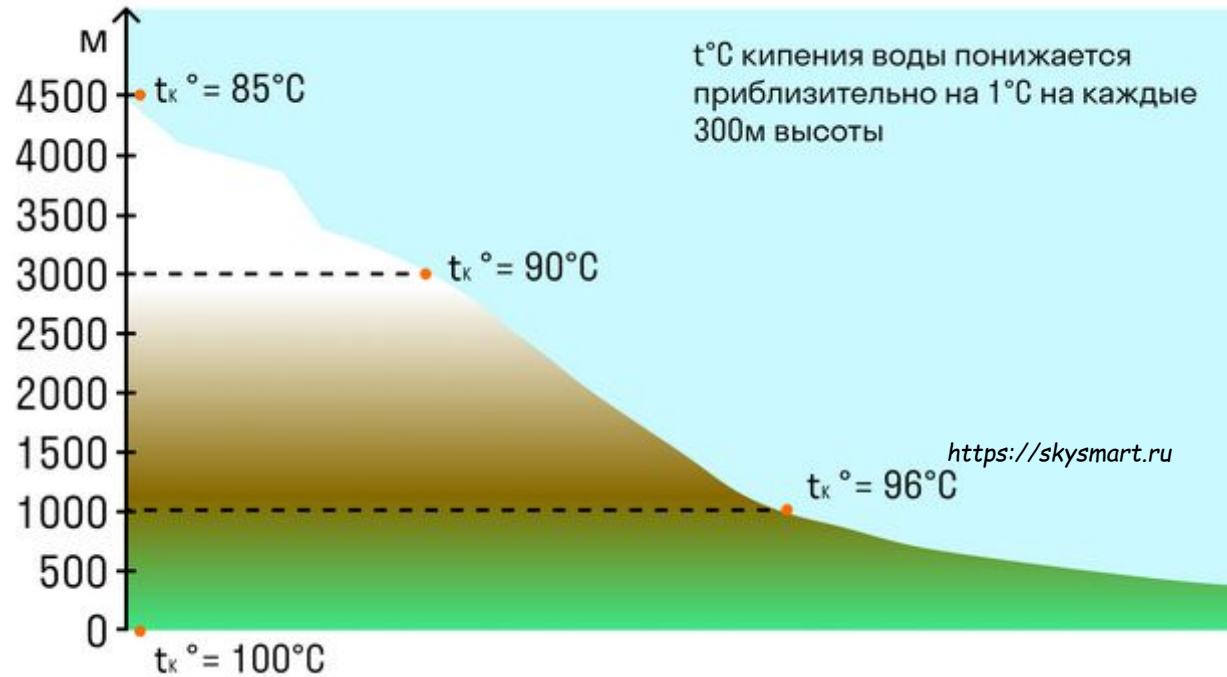
- ◇ при любой температуре
- ◇ с поверхности жидкости

### Кипение

- ◇ при определенной температуре
- ◇ с поверхности жидкости



t, °C	Вещество
-253	водород
-183	кислород
35	эфир
78	спирт
100	вода
357	ртуть
3050	железо
4200	графит
5657	вольфрам



## Испарение и конденсация



Если число частиц, покидающих жидкость за единицу времени, больше числа частиц, возвращающихся в жидкость за тот же промежуток времени, то пар называется **ненасыщенным**.

Если число частиц, покидающих жидкость за единицу времени, равно числу частиц, возвращающихся в жидкость за тот же промежуток времени, то пар называется **насыщенным** = пар в динамическом равновесии со своей жидкостью

Давление насыщенного пара имеет единственное значение, зависящее только от его температуры (справочные таблицы);

Давление пара не может превышать давление насыщенного пара;

Если давление пара меньше давления насыщенного пара, то пар ненасыщенный;

Относительная влажность = степень насыщенности пара:  $p_p / p_{np}$

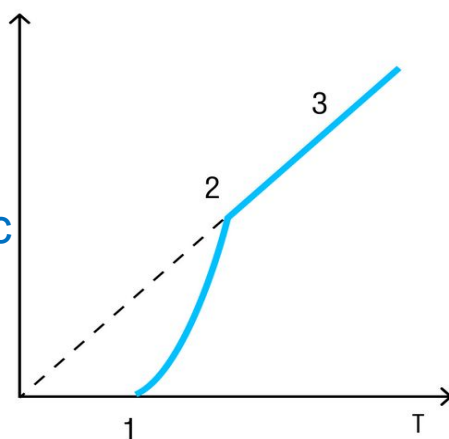
По закону Дальтона, давление влажного воздуха равно сумме давления сухого воздуха и давл  $p_{св} = p_{св} + p_n$ .

При постоянной  $T$  плотность насыщенного пара не зависит от его объема

Давление насыщенного пара не зависит от его объема

При неизменном объеме плотность насыщенного пара растет с повышением  $T$  и уменьшается с понижением  $T$

Давление и  $T$  насыщенного пара растут быстрее, чем по линейному закону, который справедлив для идеального газа



# Влажность воздуха - содержание водяного пара в

воздухе. Характеристики влажности воздуха = *гигрометрические*

характеристики:

	Название	Описание	Ед. изм.
<b>e</b>	Упругость (давление) водяного пара	парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе $e_0 = 6,11 \text{ гПа}$ $a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$	гПа
<b>E</b>	Упругость насыщения / давление насыщенного водяного пара	$E(t)$ $e_{max} = E$	гПа
<b>d</b>	Дефицит насыщения	$d = E - e$ характеризует, сколько водяного пара недостает для насыщения воздуха при данной температур	гПа
<b>f</b>	Относительная влажность воздуха	$f = \frac{e}{E} * 100\%$	%
<b>td</b>	Температура точки росы	та температура, при которой содержащийся в воздухе водяной пар достигает насыщения при неизменном общем давлении воздуха, $td \leq t$	°C
<b>Δ</b>	Дефицит точки росы	$\Delta = t - td$ температура, при которой содержащийся в воздухе пар при постоянном общем атмосферном давлении становится насыщенным	°C
<b>a</b>	Абсолютная влажность	Показывает, какая масса водяного пара в граммах содержится в единичном объёме влажного воздуха $a = 217 \frac{e}{T}$ $a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$	г/м <sup>3</sup>
<b>s</b>	Удельная влажность / массовая доля водяного пара	Показывает, какая масса водяного пара содержится в единичной массе влажного воздуха $s = 0,622 \frac{e}{p}$	г/кг
<b>r</b>	Отношение смеси	Характеризует соотношение массы водяного пара и массы сухой части влажного воздуха в одном и том же объёме $r = \frac{622 e}{p - e}$	г/кг

<b>e</b>	Упругость (давление) водяного пара	парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе $e_0 = 6,11$ гПа	гПа мба
----------	------------------------------------	--	------------

давление, которое имел бы в.п., содержащийся в газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же  $T$

мм рт. ст.

$$P_{общ} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

n

$P_{общ}$ (Па) – давление смеси газов (общее давление воздуха);  
 $P_1$ (Па) – парциальное давление первого газа;  
 $P_2$ (Па) – парциальное давление второго газа; ...

Температура, °C	Давление, мм рт. ст.	Плотность пара, г/см <sup>3</sup>
-10	1,95	2,14
-8	2,32	2,54
-6	2,76	2,09
-4	3,28	3,51
-2	3,88	4,13
0	4,58	4,84
2	5,3	5,6
4	6,1	6,4
6	7,0	7,3
8	8,0	8,3
10	9,2	9,4

**E** Упругость насыщения / давление насыщенного водяного пара

$$E =$$

максимально возможное значение парциального давления в.п. (упругости насыщения) при данной температуре

$$E_v > E_l \text{ всегда}$$

При  $T = 0^\circ\text{C}$  давление насыщенного пара:

$$E = e_0 = 6,11 \text{ гПа}$$

Давление насыщения увеличивается с температурой

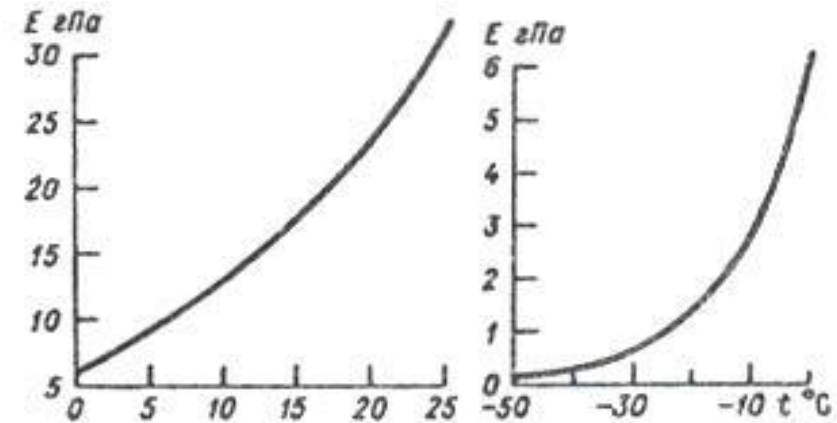
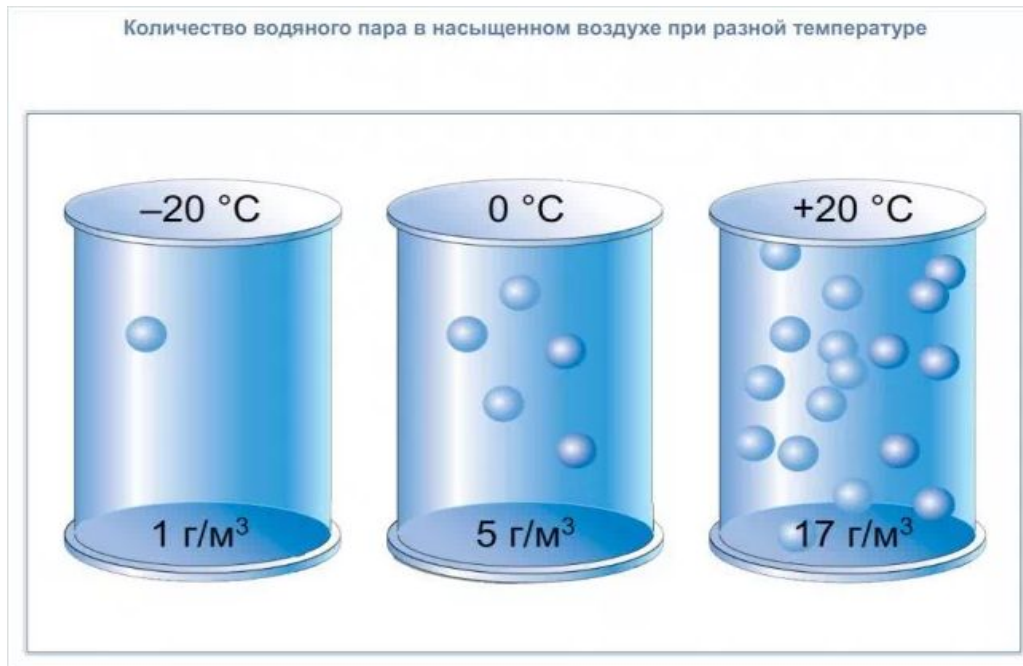
**Дефицит насыщения  $d$**  – разность между  $E$  и  $e$  при одних и тех же значениях давления и температуры:  $d = E - e$

*Состояние насыщения может быть достигнуто:*

*посредством увеличения количества в.п. в атмосфере, что связано с испарением, в ходе которого в.п. в атмосферу поступает,*

*с понижением  $T$  воздуха, т.к. при более низких температурах требуется меньше в.п. для достижения состояния насыщения в.п. слоями атмосферы*

**Чем выше температура, тем больше пара может содержаться в воздухе**



Давление насыщенного водяного пара в зависимости от температуры

[Хромов, Петросяни, 2004]

**a** Абсолютная влажность

масса водяного пара, содержащаяся в ед. объема воздуха, г/м<sup>3</sup>, кг/м<sup>3</sup>

уравнение Клапейрона–  
Менделеева:

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} \approx 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t} \quad \longrightarrow \quad a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$$

$$a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$$

R – газовая постоянная = 8,314 Дж/К·моль

При расширении воздуха его абсолютная влажность уменьшается, при сжатии - растет

Чем ниже температура, тем ближе пар к насыщению

**f** Относительная влажность воздуха  
отношение парциального давления в.п.

$$f = \frac{e}{E} * 100\%$$

к давлению насыщенного водяного пара при одних и тех же значениях давления и  $T$ , показывает насколько в.п. при данной  $T$  далёк от насыщения



$td$	Температура точки росы	та температура, при которой содержащийся в воздухе водяной пар достигает насыщения при неизменном общем давлении воздуха, $td \leq t$	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta$	Дефицит точки росы	$\Delta = t - td$ температура, при которой содержащийся в воздухе пар при постоянном общем атмосферном давлении становится насыщенным	$^{\circ}\text{C}$



При падении температуры воздуха ниже точки росы происходит конденсация водяного пара

при  $e = E$ , температура  $t$ ,

## Определение точки росы

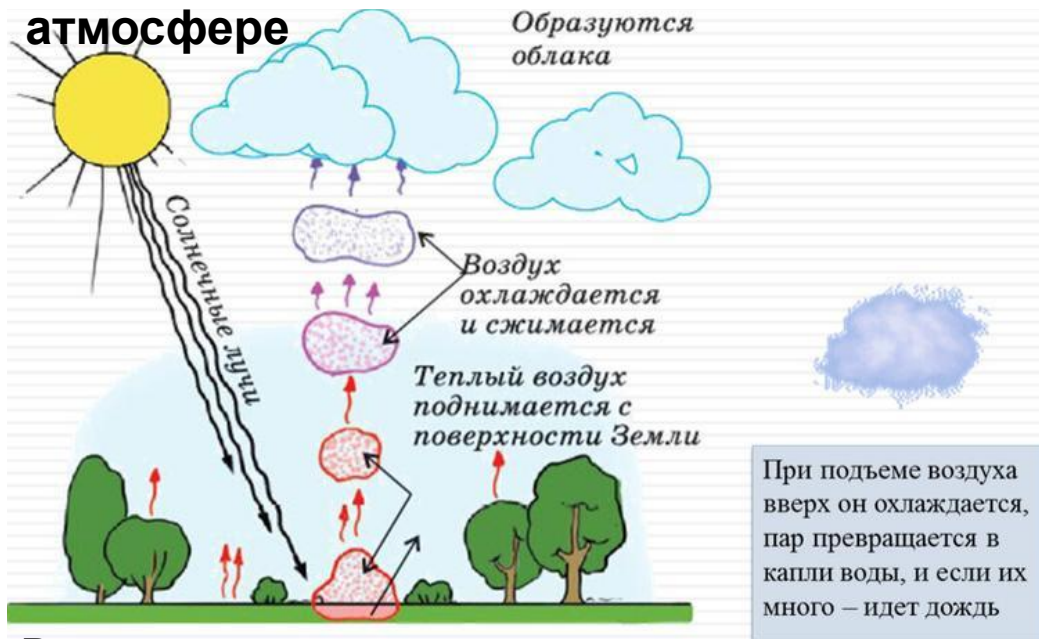
омв  $E: t = td$

Температура в помещении, $^{\circ}\text{C}$	Точка росы при относительной влажности воздуха						
	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%
+18	0,2	2,3	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1
+19	1	3,2	5,1	6,8	8,3	9,8	11,1
+20	1,9	4,1	6	7,7	9,3	10,7	12
+21	2,8	5	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9
+22	3,6	5,9	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9
+23	4,5	6,7	8,7	10,4	12	13,5	14,8
+24	5,4	7,6	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8
+25	6,2	8,5	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7



- Если фактическая температура  $T > T_d$ , то происходит испарение воды
- Если фактическая температура  $T < T_d$ , то происходит конденсация пара

# Конденсация в атмосфере



Конденсация – сопровождается выделением скрытой теплоты парообразования

- !! охлаждение воздуха
- !! уровень конденсации  $T = T_d$
- !! ядра конденсации

**ядра конденсации** — жидкие или твёрдые частички естественного или антропогенного происхождения, взвешенные в атмосфере, с радиусом порядка 0,0001–0,01 мм, на которых начинается конденсация водяного пара и в дальнейшем образуются капли облаков и туманов.

Различают:

- 1) наиболее мелкие ядра радиусом  $r < 0,1$  мкм («ядра Айткена»), в процессе конденсации не участвуют;
- 2) облачные ядра конденсации ( $r = 0,1-1,0$  мкм); именно эти ядра обеспечивают конденсацию в атмосфере;
- 3) гигантские ядра ( $r = 1,0-3,5$  мкм,  $m > 10-11$  г), очень немногочисленные, но важные для образования крупных капель в облаках.

Несколько тысяч ядер конденсации в 1 см<sup>3</sup> воздуха  
Продукты конденсации в. п. в атмосфере





<b>s</b>	Удельная влажность / массовая доля водяного пара	Показывает, какая масса водяного пара содержится в единичной массе влажного воздуха $s = 0,622 \frac{e}{p}$	г/кг
<b>r</b>	Отношение смеси	Характеризует соотношение массы водяного пара и массы сухой части влажного воздуха в одном и том же объёме $r = \frac{622 e}{p-e}$	г/кг

$$a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$$

$e \ll P,$   
то

$$a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$$

$$a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$$

как  $\rho$  мало отличается от  $\rho_{\text{вл}}$

$$a = \frac{0.86e}{1 + \alpha t}$$

Условия насыщения:

$$\begin{aligned} t &= t_d \\ e &= E \\ f &= 100 \\ d &= 0 \\ \Delta &= 0 \end{aligned}$$

В воздухе атмосферы не может содержаться пара больше, чем нужно для насыщения (в технических устройствах перегретый пар возможен)

$$a = \frac{0.86e}{1 + at}$$

$R_c$  – удельная газовая постоянная сухого воздуха, = 287 м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>К

$R_{п}$  – удельная газовая постоянная в.п., = 461,5 Дж/кгК

Отношение  $R_{п}/R_c = 1,608$

Уравнение состояния влажного воздуха :  $PV =$

$$R_c T(1+0,608 s)$$

или  $P = \rho R_c T(1+0,608 s)$  масса в.п. в 1 кг газа = удельная влажность

Виртуальная  
температура:

$$T_v = T(1+0,608 s) = T + 0.608 Ts = T +$$

$$T_v = T(1+0,608$$

$$\Delta T_v = 0.608 Ts = 0,308 e/P$$

$\Delta T_v$

такую температуру должен иметь сухой воздух, чтобы его плотность при том же давлении равнялась плотности влажного воздуха

Всегда  $T_v > T \rightarrow \rho_{вл} < \rho$  при одном и том же давлении

$$\Delta T_{vm} = 0.378 \frac{E(T)}{P}$$

$T$ °С	-40	-30	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$\Delta T_{vm}$ °С	0,01	0,03	0,12	0,19	0,3	0,4	0,6	0,9	1,3	1,9	2,6	3,6	4,9	6,6	8,9

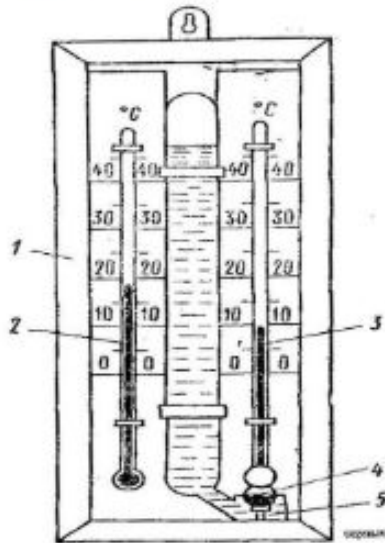
при  $p = 1000$

# Измерение влажности

## Психрометрический метод

Более точный

Ограничения:  $\geq -10^{\circ}\text{C}$



Психрометр – пара термометров с сухим и со смоченным резервуарами

Термометрическая жидкость – ртуть (Hg)

- Температура кипения:  $356,7^{\circ}\text{C}$
- Температура замерзания  $-38,8^{\circ}\text{C}$

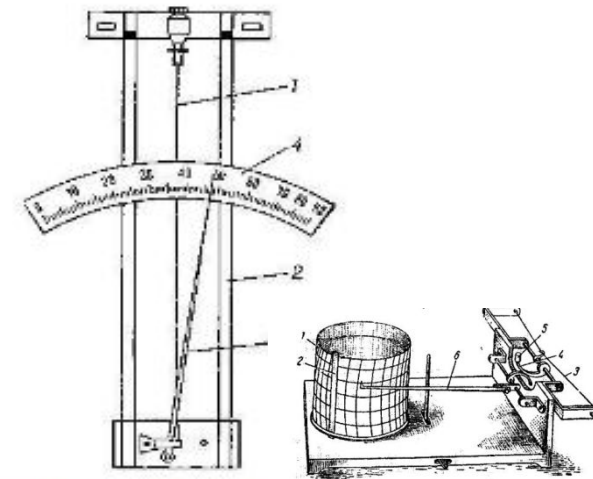
Измеряет температуру воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) по сухому и по смоченному термометрам

Характеристики влажности расчетные!

## Сорбционный метод

Менее точный

Нет ограничений по температуре

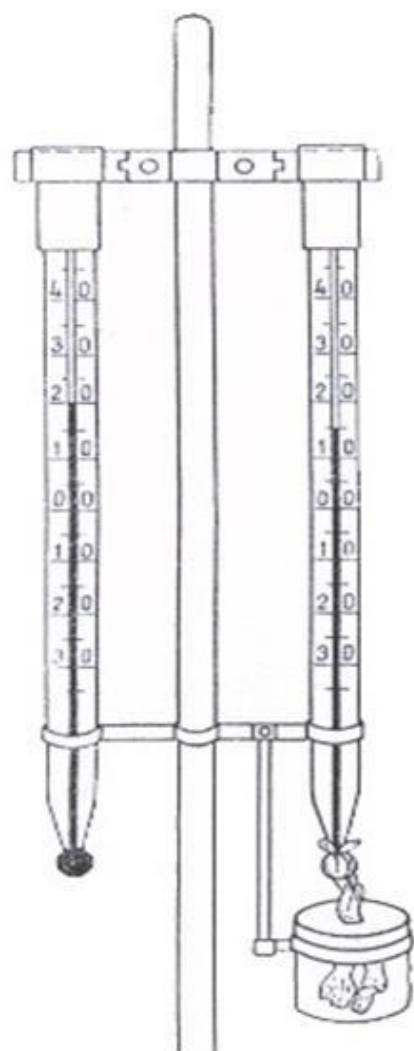


Прибор основан на свойстве обезжиренного волоса изменять свою длину при изменении относительной влажности

Волосной гигрометр

Чувствительный элемент – обезжиренный волос

Измеряет относительную влажность  $f$  (%)



### ПСИХРОМЕТРИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометров в градусах											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Относительная влажность, %											
0	100	81	63	45	28	11						
1	100	83	65	48	32	16						
2	100	84	68	51	35	20						
3	100	84	69	54	39	24	10					
4	100	85	70	56	42	28	14					
5	100	86	72	58	45	32	19	6				
6	100	86	73	60	47	35	23	10				
7	100	87	74	61	49	37	26	14				
8	100	87	75	63	51	40	29	18	7			
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11			
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5		
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8		
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11		
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9	
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	5
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15	8
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	10
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20	13
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	24
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	29
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36	30
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37	32
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38	33
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	34

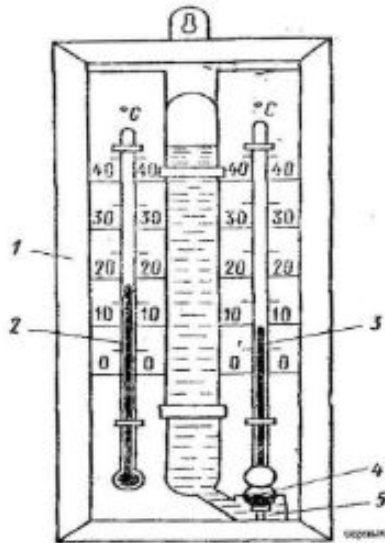


# Измерение влажности

## Психрометрический метод

Более точный

Ограничения:  $\geq -10^{\circ}\text{C}$



Психрометр – пара термометров с сухим и со смоченным резервуарами

Термометрическая жидкость – ртуть (Hg)

- Температура кипения:  $356,7^{\circ}\text{C}$
- Температура замерзания  $-38,8^{\circ}\text{C}$

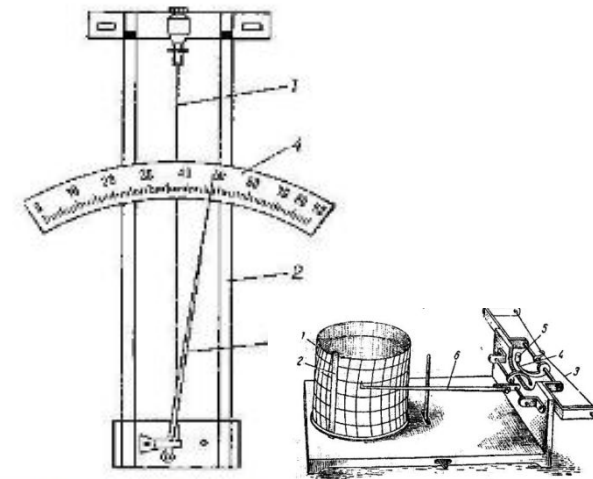
Измеряет температуру воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) по сухому и по смоченному термометрам

Характеристики влажности расчетные!

## Сорбционный метод

Менее точный

Нет ограничений по температуре



Прибор основан на свойстве обезжиренного волоса изменять свою длину при изменении относительной влажности

Волосной гигрометр

Чувствительный элемент – обезжиренный волос

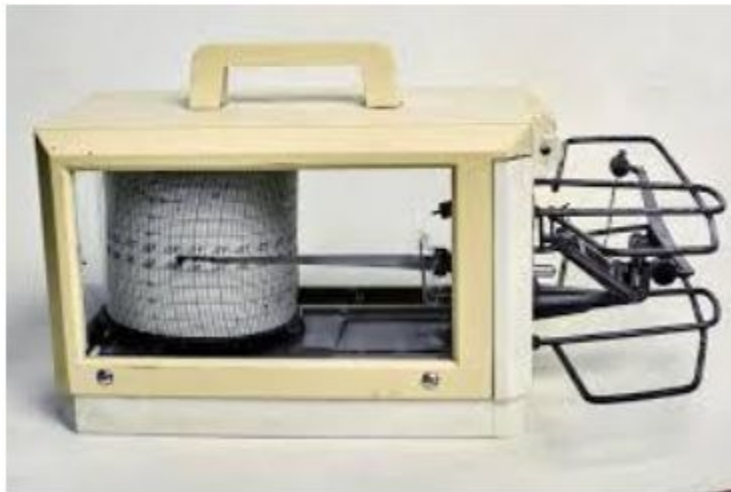
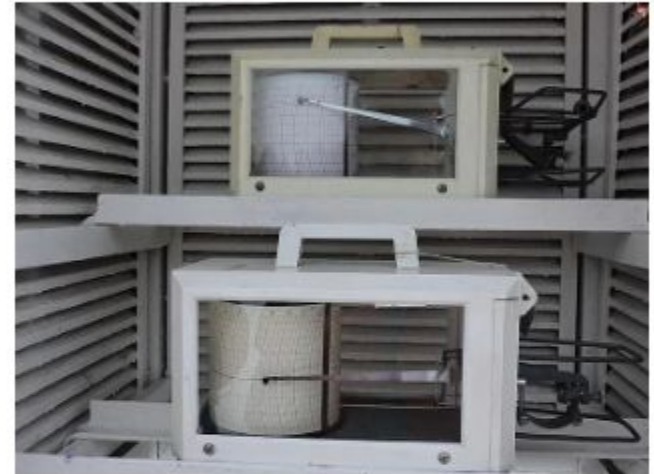
Измеряет относительную влажность  $f$  (%)

# Гигрограф

Самописец влажности воздуха находится в будке для самописцев.

Чувствительный элемент – пучок обезжиренных волос.

Преимущества: наглядность и непрерывность



Метеорология и климатология стр....

ПСИХРОМЕТРИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА

Показания сухого термометра, °С	Равность показаний сухого и влажного термометров в градусах											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Относительная влажность, %											
0	100	81	63	45	28	11						
1	100	83	65	48	32	16						
2	100	84	68	51	35	20						
3	100	84	69	54	39	24	10					
4	100	85	70	56	42	28	14					
5	100	86	72	58	45	32	19	6				
6	100	86	73	60	47	35	23	10				
7	100	87	74	61	49	37	26	14				
8	100	87	75	63	51	40	29	18	7			
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11			
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5		
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8		
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11		
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6	
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9	
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	5
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15	8
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	10
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20	13
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	24
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	29
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36	30
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37	32
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38	33
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	34

Парциальное давление в.п. -  
психрометрическая формула:

$$e = E'в - Ap (t - t'), \text{ (вода)}$$

$$e = E'л - Ap (t - t'), \text{ (лед)}$$

где  $Eв$  и  $Eл$  – давление насыщенного  
водяного пара над плоской  
поверхностью чистой воды и чистого  
льда при температуре смоченного  
термометра, гПа;

$p$  – атмосферное давление, гПа;

$t$  и  $t'$  – температура сухого и  
смоченного термометров, °С;

$A$  – психрометрический коэффициент,  
зависящий от скорости движения  
воздуха около резервуара смоченного  
термометра

(для стационарного психрометра  $A = 0,000\ 794\ 7\ ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  
для аспирационного психрометра  $A = 0,000\ 662\ ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

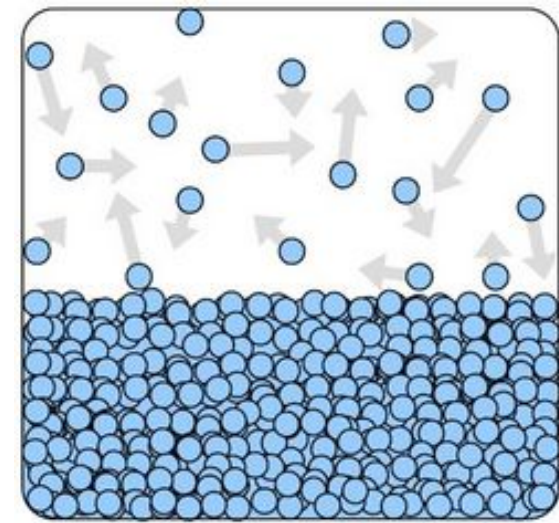
# Главный источник водяного пара в атмосфере

– испарение воды с поверхности океанов, морей, водоёмов, влажной почвы, растений.

С п/п за год испаряется свыше 500 000 км<sup>3</sup> воды (количество воды, почти равное количеству воды в Чёрном море).

*Соотношение между температурой воздуха и его максимальным влагосодержанием :*

Температура, °С	Максимальное содержание влаги, г/м <sup>3</sup>
-30	0,4
-20	1,1
-15	1,6
-10	2,4
-5	3,4
0	4,9
+5	6,3
+10	9,4
+15	12,8
+20	17,3
+25	23,1
+30	30,4



! постоянное изменение агрегатного состояния

! **выделение или поглощение большого количества тепла** при смене агрегатного состояния

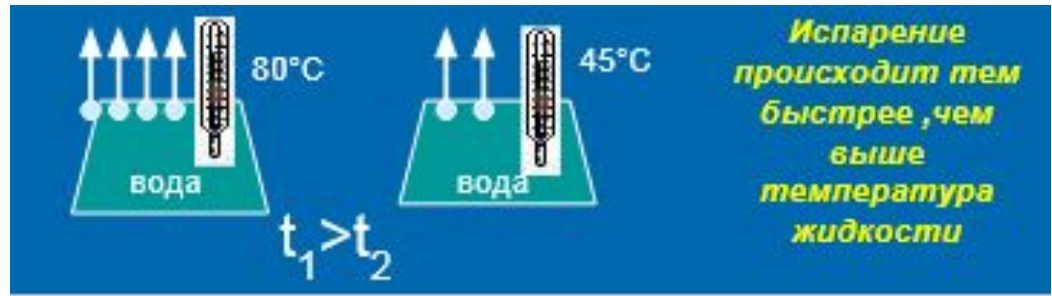
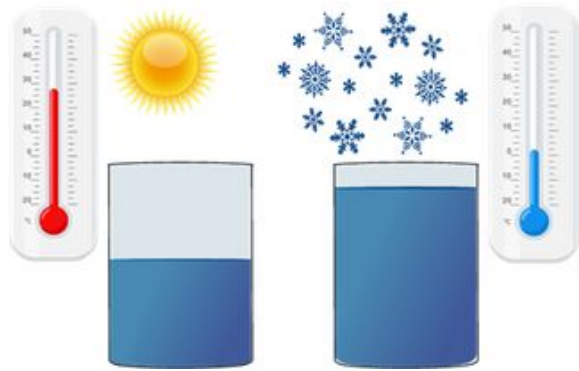
$L = 2,5 \cdot 10^6$  Дж/кг ( $L$  – удельная теплота парообразования или конденсации)

Водяной пар активно поглощает лучистую длинноволновую энергию

**молекулярная  
диффузия  
турбулентная  
диффузия**



## Испарение происходит при любой



Скорость испарения зависит от метеорологических условий и от свойств п/п!! :

от ее температуры, влажности, физических свойств,  
от состояния поверхности, от рельефа, растительного покрова...

- ✓ Ровная поверхность испаряет меньше, чем шероховатая
- ✓ Рыхлая поверхность испаряет меньше, чем плотная
- ✓ На возвышенностях испарение больше
- ✓ Южные склоны испаряют больше, чем северные
- ✓ Растительность уменьшает испарение с п/п

Испарение зависит:  
от влажности, от вида жидкости,  
от ветра, от температуры  
жидкости и давления, от площади  
свободной поверхности

Скорость испарения,  
закон Дальтона:

$$W = A \frac{(E_1 - e)}{p}, \text{ мм/с}$$

**ИСПАРЯЕМОСТЬ** - максимально возможное испарение при данных метеорологических условиях и в условиях неограниченного запаса влаги. Испаряемость выражается в миллиметрах слоя испарившейся воды и может сильно отличаться от фактического испарения.

Таблица 14

Испарение и испаряемость (в мм) для различных физико-географических зон

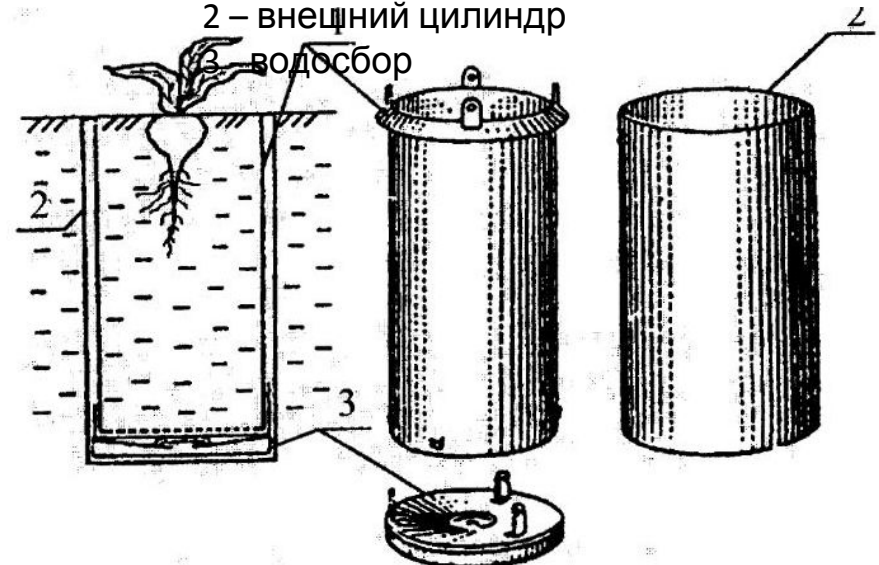
Северное полушарие

Наименование зоны	Испарение	Испаряемость
Тундра . . . . .	70—120	200—300
Тайга . . . . .	200—300	300—600
Смешанные леса . . . . .	250—430	400—850
Степи . . . . .	240—550	600—1100
Полупустыни . . . . .	180—200	700—900
Пустыни . . . . .	50—100	800—1000
Субтропики . . . . .	300—750	800—1300

[Борисов А.А. Климаты СССР]

Почвенный испаритель ГГИ-500-50

- 1- внутренний цилиндр
- 2 - внешний цилиндр



3 - водосбор

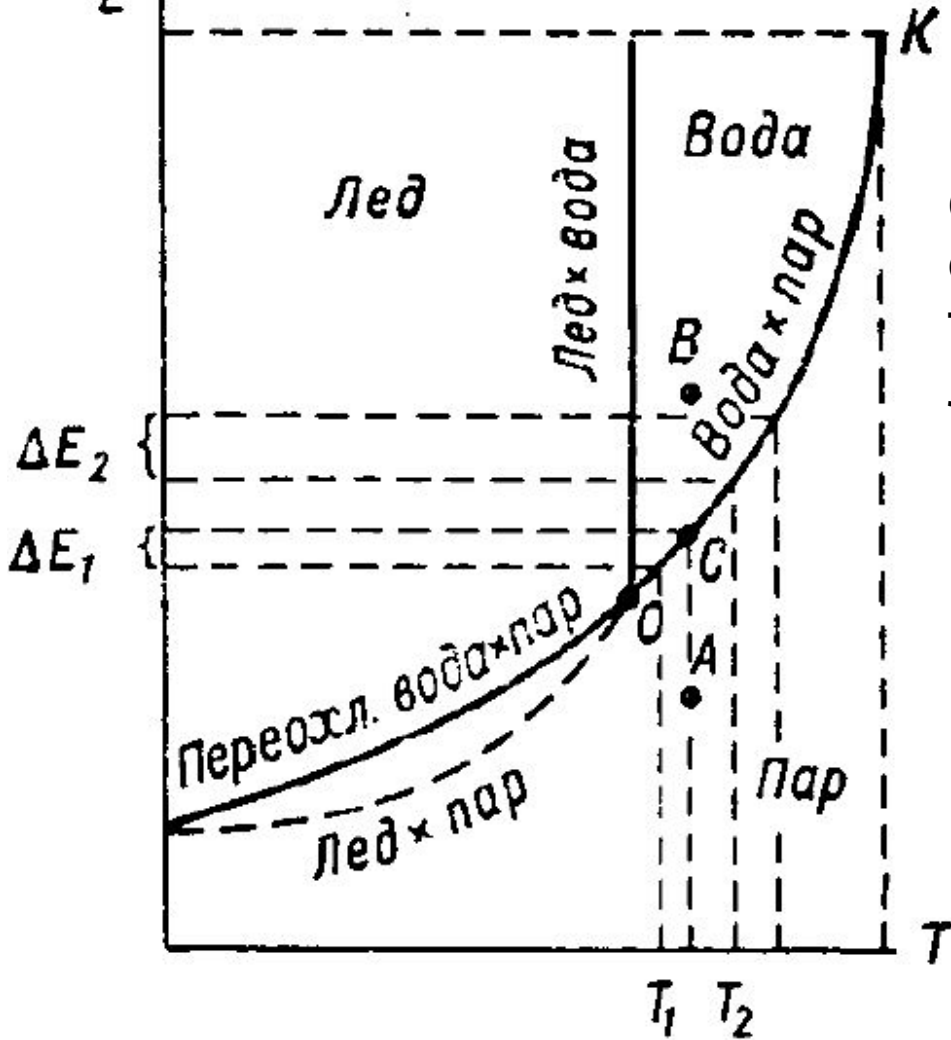
$$E = 0.02 (p_1 - p_2) + r_1 - r_2$$

$E$  – испарение, мм;  $p_1$  – вес испарителя при предыдущем взвешивании, г;  $p_2$  – вес испарителя в данный момент;  $r_1$  – количество воды в водосборном сосуде, мм;  $r_2$  – количество выпавших осадков за период между взвешиваниями, мм.

Коэффициент 0,02 служит для перевода весовых единиц (г) в линейные (мм).

# Диаграмма равновесия фаз

ВОДЫ



**Фазовое равновесие** - это одновременное существование термодинамически равновесных фаз при одинаковых P и T

[Матвеев, 2000]

**Тройная точка:**

температура плавления льда  $t = 0,0076^\circ$

давление пара  $e = p = 6.11$  мб

Фаза – однородная область вещества

Связь температуры и давления фазового перехода (кипения, плавления и др.) теоретически определяется по уравнению Клапейрона – Клаузиуса :

$$E = E_0 \cdot 10^{\frac{at}{b+t}}$$

$$E_0 = 6.11 [\text{гПа}]$$

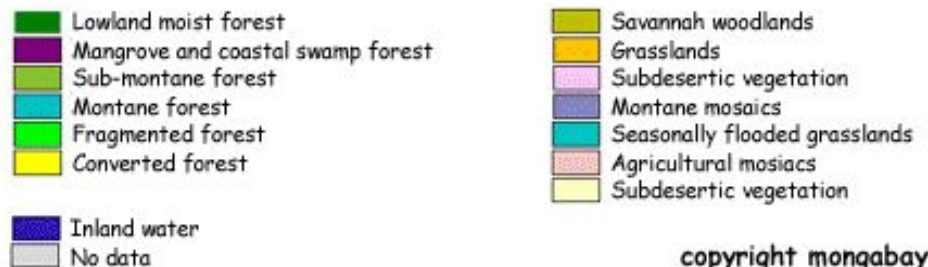
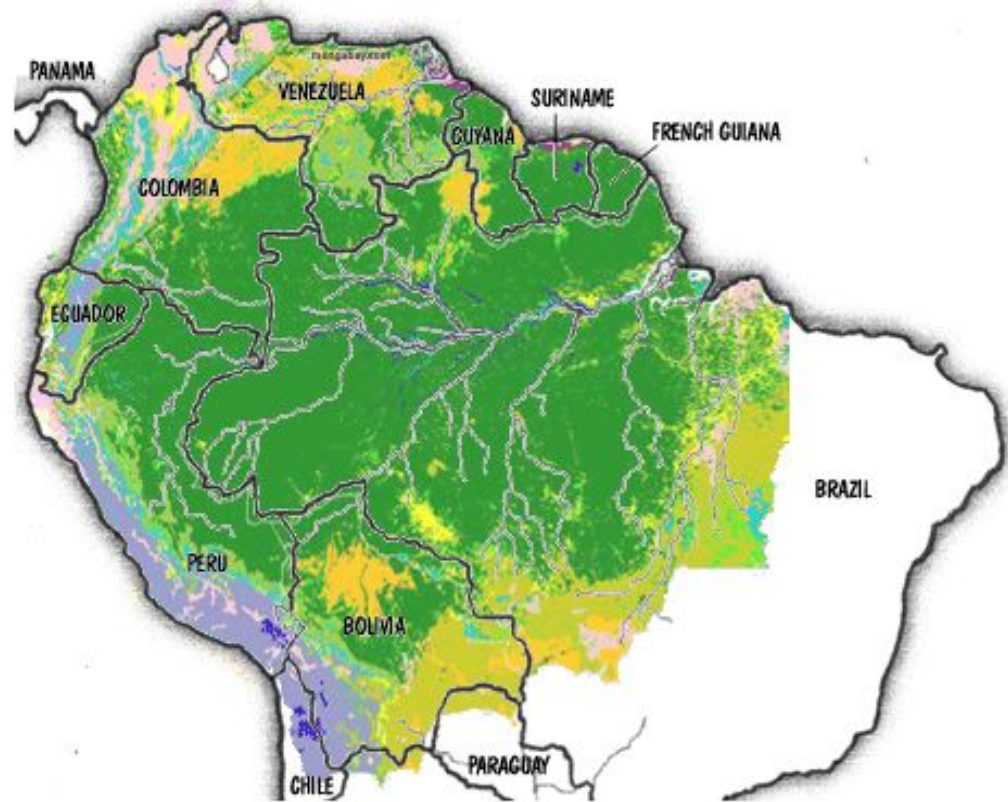
коэф	a	b
вода	7.63	241.9
лед	9.50	265.5

На практике применяют эмпирические формулы. Например, формулу Магнуса :

При  $t=15^\circ\text{C}$  и при любом давлении давление насыщенного пара (над водой) =  $E [\text{гПа}] = 6.11 \cdot 10^{7.63 \cdot 15 / (241.9 + 15)} \approx 17 \text{ гПа}$

- среднее парциальное давление в.п.  $e \approx 12$  гПа,
- среднее значение абсолютной влажности  $a = 11$  г/м<sup>3</sup>.
- среднее значение относительной влажности  $f \approx 70\%$
- средняя массовая доля водяного пара  $s \approx 8$  г/кг
- в столбе атмосферы сечением 1 м<sup>2</sup> содержится около 29 кг в.п.
- максимум влажности - в экваториальной области, но не в открытом океане, а в Амазонии
- **!! самые высокие и самые низкие значения - над континентами.**

## Джунгли Амазонии - самое влажное место на Земле



copyright mongabay.com

## Самые сухие места на Земле

### Антарктида



Это ст. Мирный, но самое холодное и сухое место – это ст. Восток. Зимой температура там достигает  $-80^{\circ}\text{C}$ , и при относительной влажности 70% парциальное давление водяного пара зимой не превышает  $0,07$  гПа.

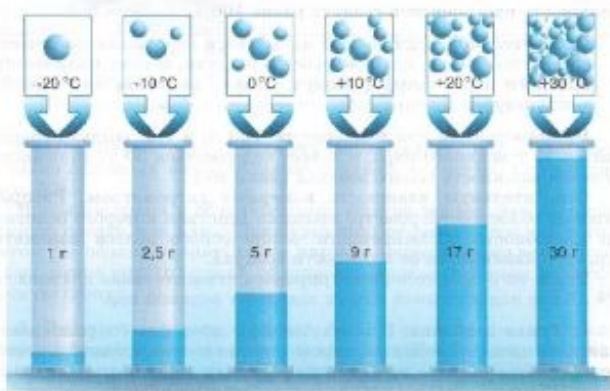
### Атакама



В Южной Америке пустыни, располагаясь между  $5^{\circ}$  и  $30^{\circ}$  ю. ш., образуют вытянутую, свыше 3 тыс. км, полосу вдоль западного Тихоокеанского побережья. Здесь с севера на юг расположены пустыни Сечура, Пампа-де-Тамаругаль, Атакама, а за горным хребтом Анд - пустыни Монте и Патагонская. Летом в предгорных областях Анд при температуре  $36^{\circ}\text{C}$  относительная влажность по гигрометру меньше 1%

# Суточный ход характеристик влажности

## Зависимость от температуры



Испарение – процесс непрерывный.  
Ход испарения соответствует ходу  $T$   
В СХ – 1 максимум (13-14 ч) и 1 минимум (ночь)  
В ГХ – максимум летом (июль), минимум зимой (декабрь)

Самое низкое содержание  
водяного пара перед  
восходом солнца,  
когда самое низкое значение  
температуры воздуха

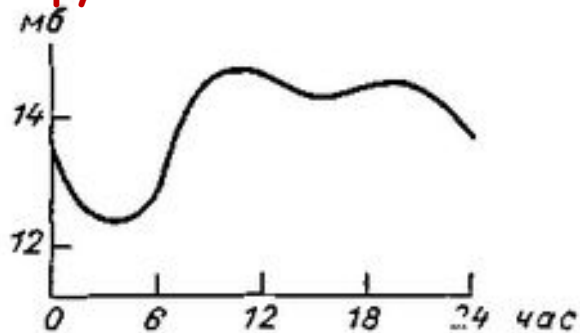
Как и в годовом ходе  
характеристик влажности:

$e$  повторяет ход  $t$

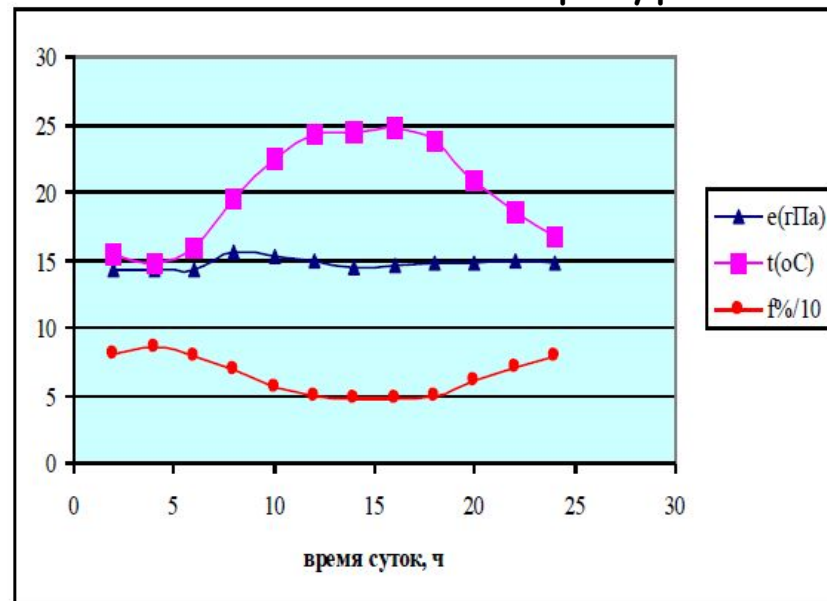
$f$  имеет обратный ход

# Суточный и годовой ход влагосодержания воздуха у земной поверхности связан с соответствующими периодическими изменениями температуры

## Упругость в.п.



Двойной суточный ход в Иркутске в июле



### ○ Суточный ход упругости в.п.

небольшой, лучше выражен в многолетних

средних, чем в отдельные дни, как и суточный ход температуры

### ○ Может быть простым и двойным

Простой - совпадает с суточным ходом температуры (один максимум и один минимум), характерен для мест с достаточным количеством влаги и в холодный период в глубине материков (над океанами и зимней сушей): минимум - на восходе Солнца, максимум в 14-15 ч.

### Двойной (два максимума и два минимума)

характерен для летнего сезона на суше, обусловлен развитием конвекции над сушей летом в дневные часы: главный минимум - после восхода Солнца, затем рост до 9 ч., далее с развитием конвекции второй минимум - в 15-16 ч., после затухания конвекции - второй максимум в 21-22 ч.

### Суточный ход относительной влажности однороден над океанами и над сушей и

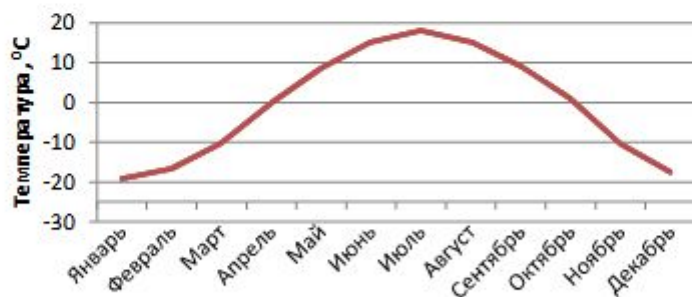
противоположен суточному ходу температуры воздуха: максимум - перед восходом Солнца, минимум - перед полуднем

# Годовой ход характеристик влажности

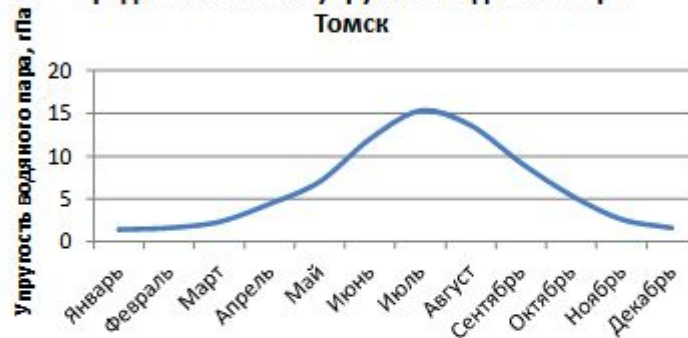
## характеристик влажности

### Зависимость от температуры

Средняя месячная температура воздуха  
Томск



Средняя месячная упругость водяного пара  
Томск



Средняя месячная относительная влажность  
Томск

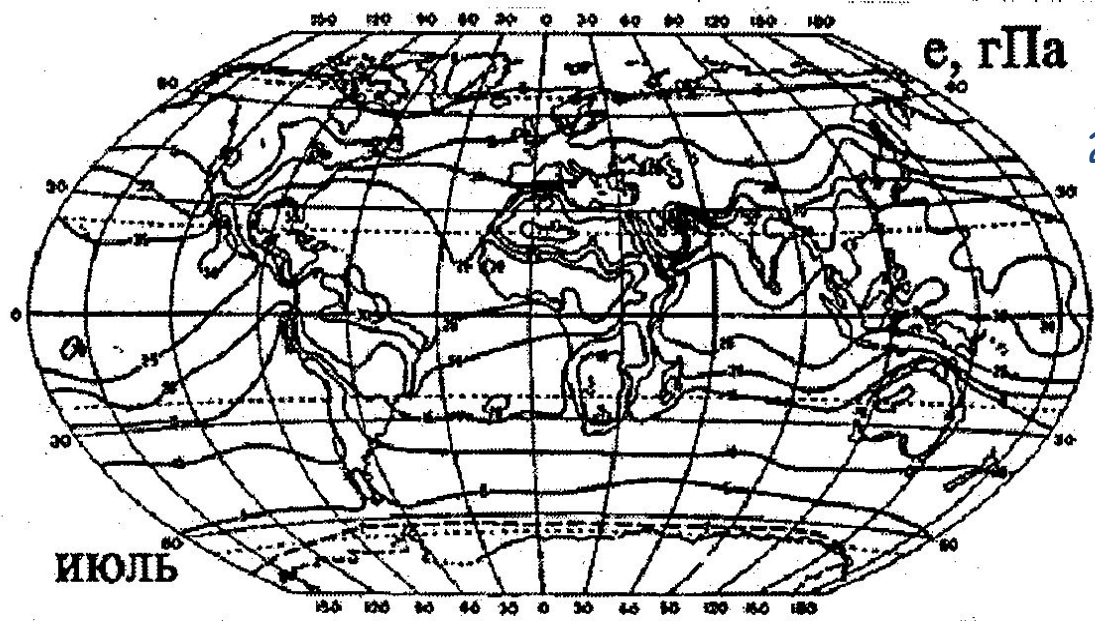


#, (мб)

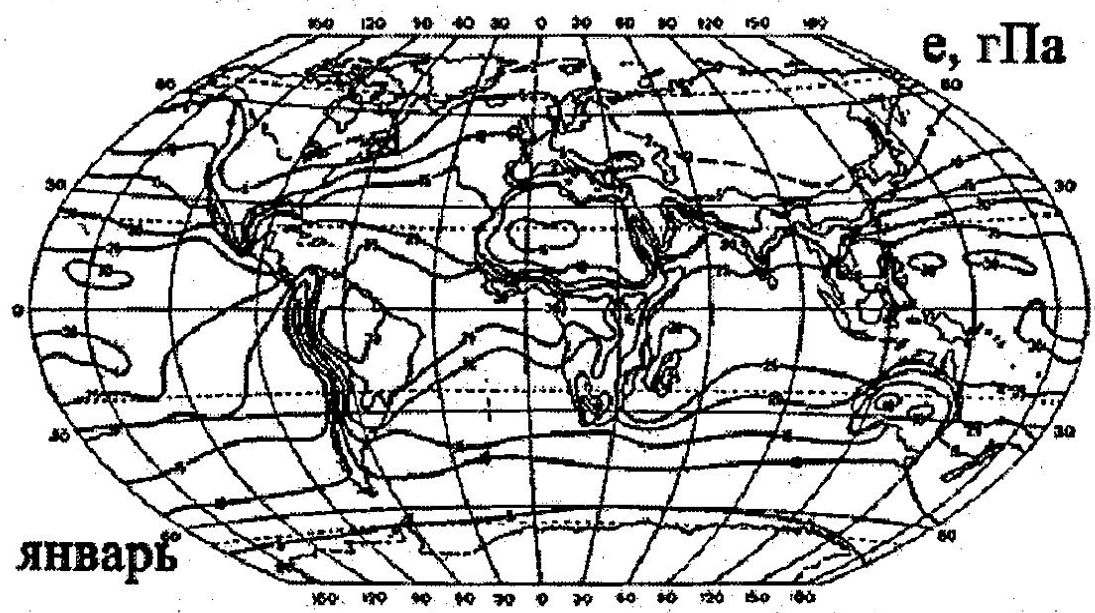
Москва (конт.) — январь 3, июль 16;  
Париж (морс.) — январь 6, август 14;  
Пекин (мус.) — январь 3, июль 24;  
Джакарта (экв.) — август 26, апрель 29.

- Годовой ход упругости в.п. соответствует г/х температуры: максимум летом, минимум зимой
- Годовая амплитуда упругости пара в континентальном климате больше, чем в морском, максимальна - в муссонном климате, минимальна - в экваториальном





ИЮЛЬ



январь

зависит:

- 1) от испарения в каждом данном районе;
- 2) от переноса влаги воздушными течениями из одних мест Земли в другие

- изолинии значительно отклоняются от широтных кругов вследствие влияния размещения континентов и океанов,  
 - максимум влажности - в экваториальной области, но не в открытом океане, а в Амазонии-самые высокие и самые низкие значения - над континентами.

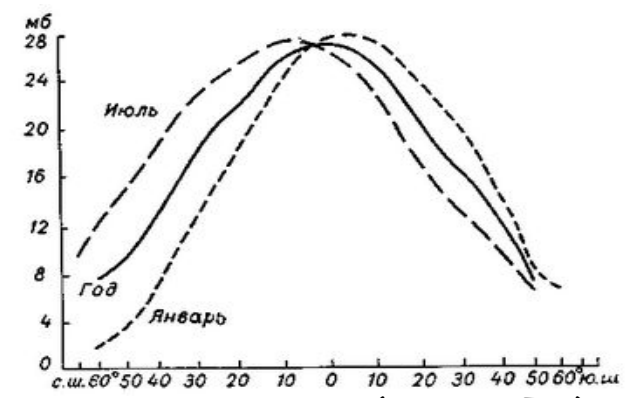
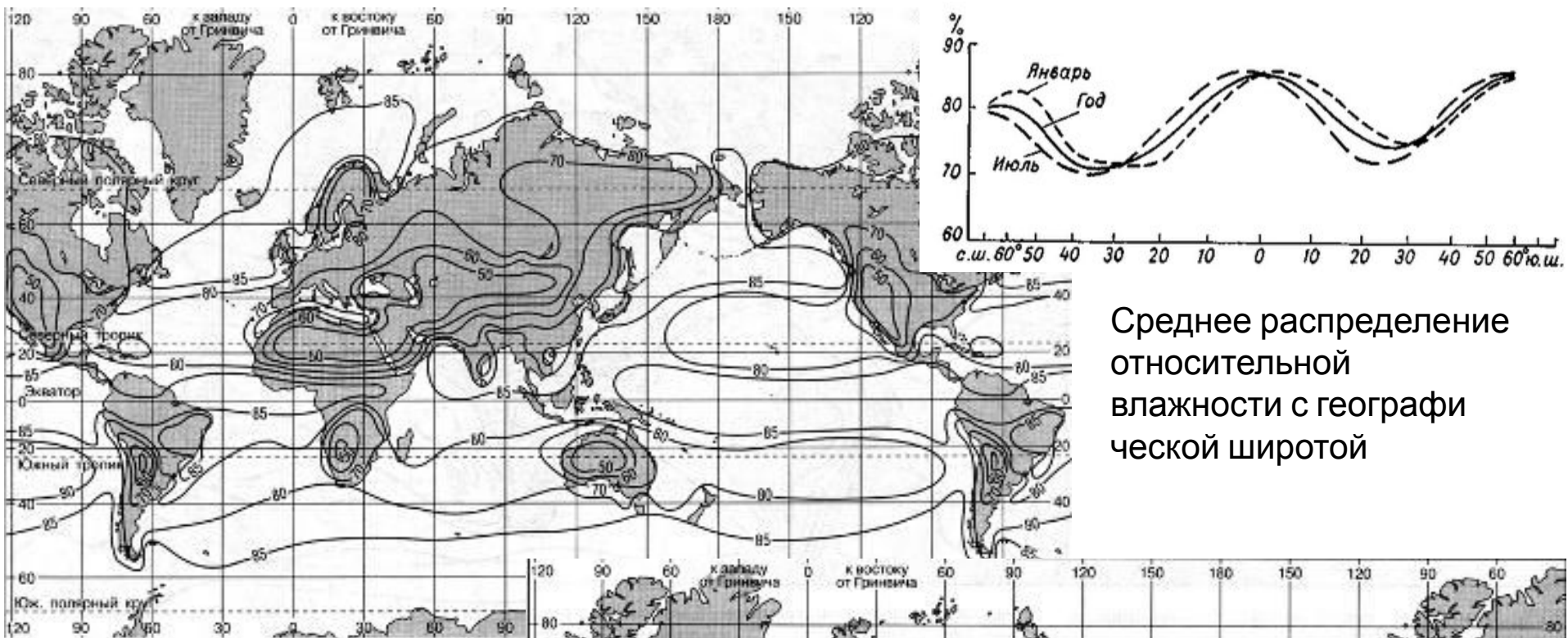


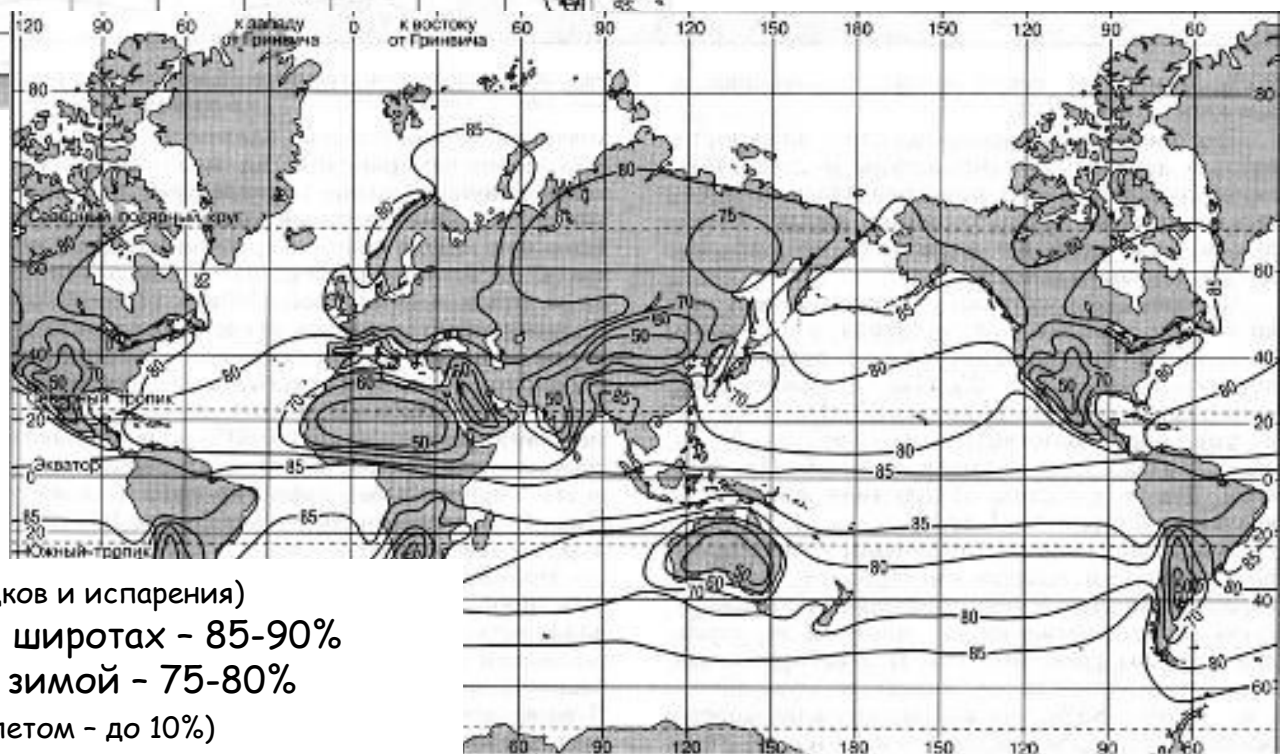
Рис. 19. Среднее распределение парциального давления водяного пара.

убывает от экватора (20-30 гПа) к полюсам (< 5 гПа)



Среднее распределение относительной влажности с географической широтой

Географическое распределение средней месячной относительной влажности воздуха в июле (верхний рисунок) и январе (нижний рисунок) [Братков и Воронин, 2015]



- в экв. (из-за большого колич-ва осадков и испарения) и поляр. (из-за низких температур) широтах - 85-90%
- в умер. широтах летом - 60%, зимой - 75-80%
- минимум - в тропиках суши (летом - до 10%)

# ЯНВАРЬ

СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН



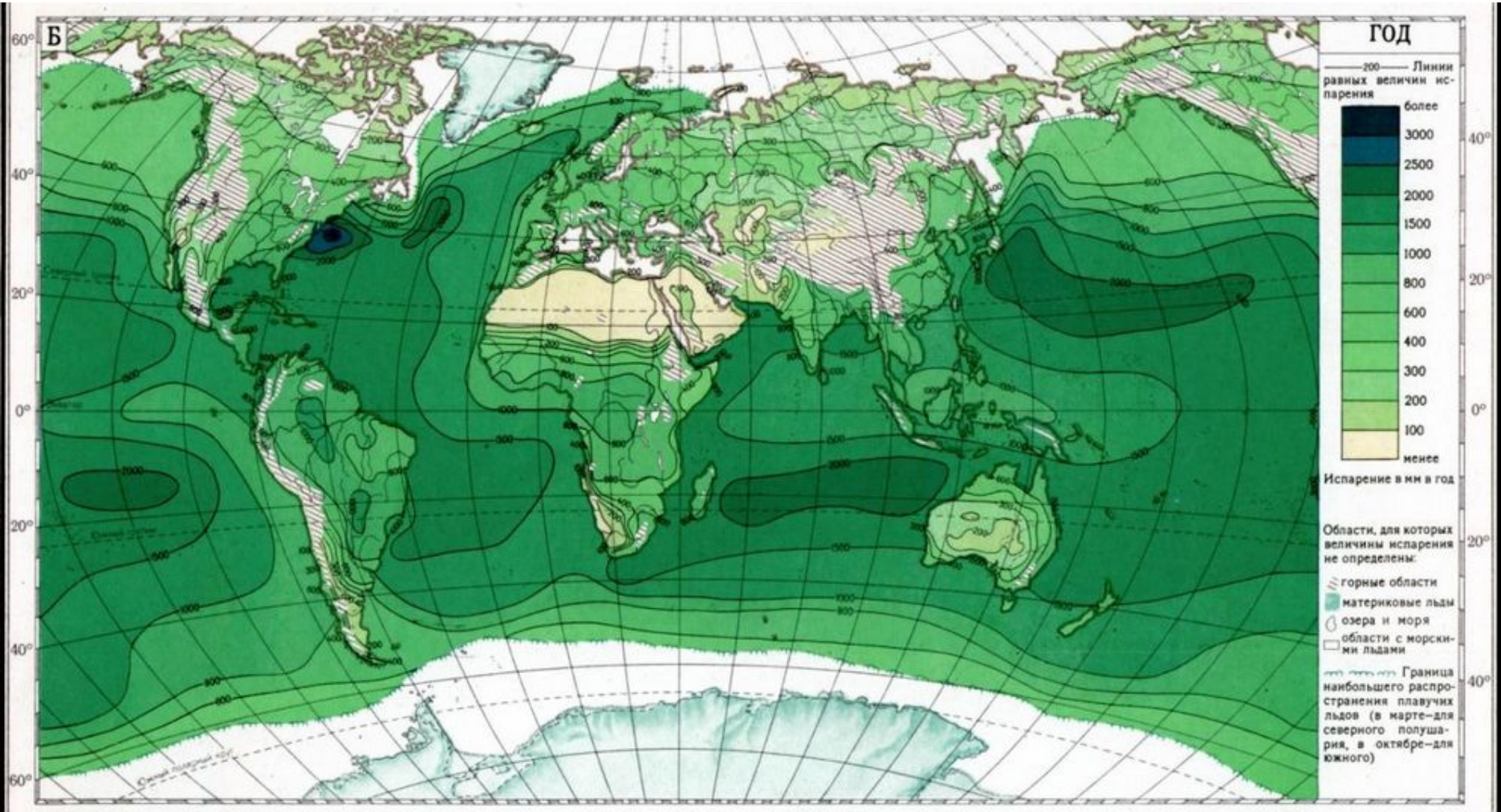
# ИЮЛЬ

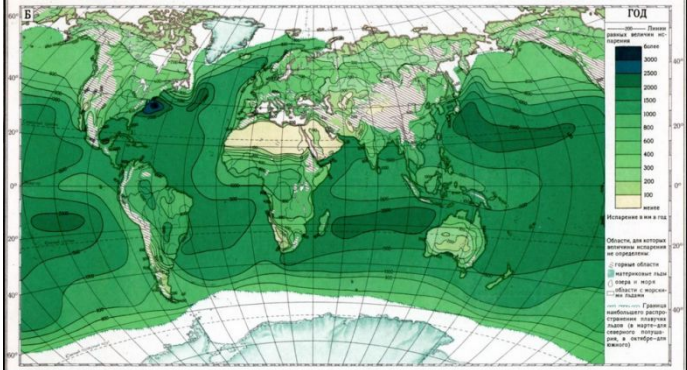


Масштаб 1:40 000 000

# ИСТАРЕНИЕ

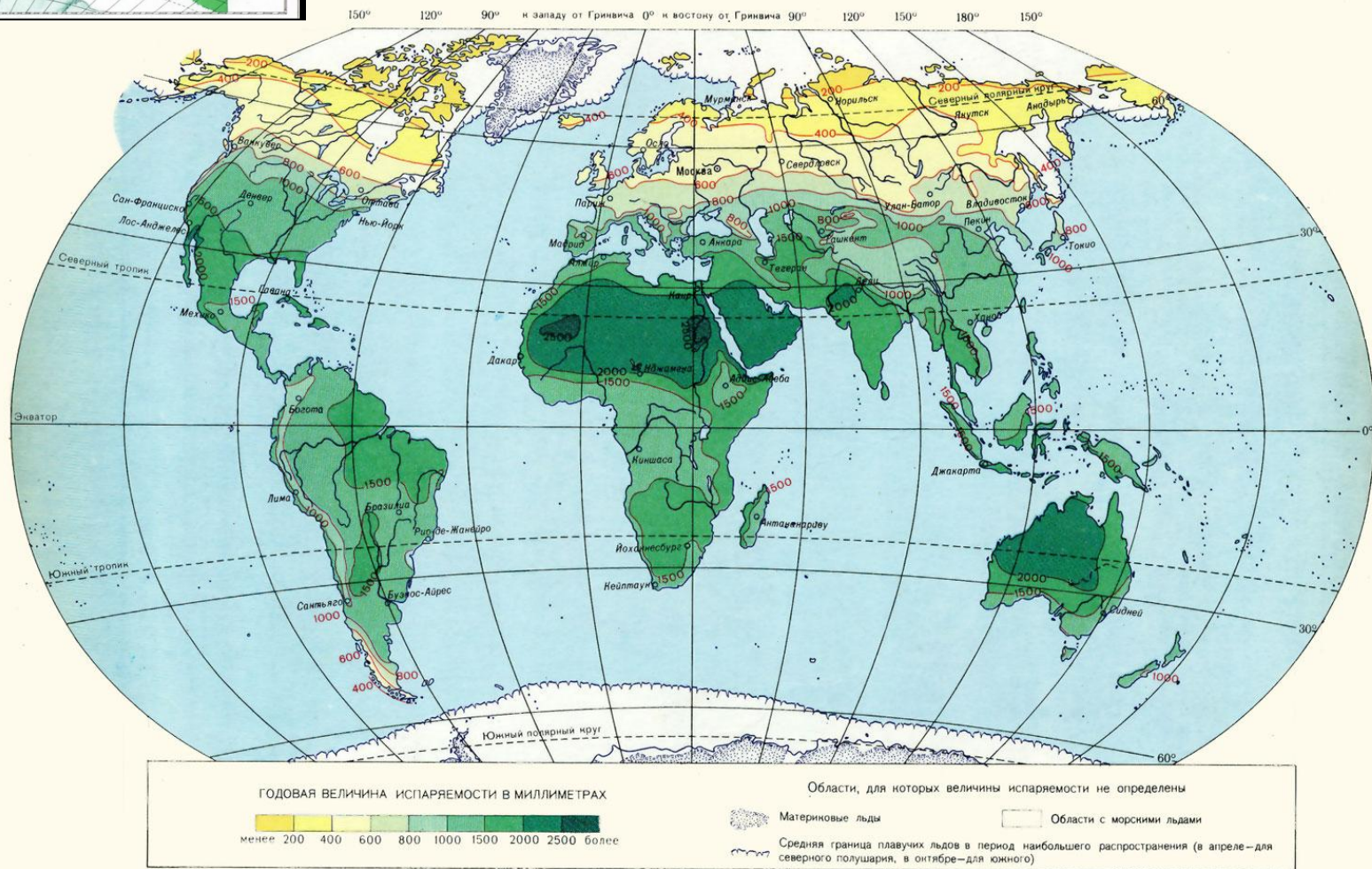
- **На суше:** максимум – экваториальные широты (800 – 1000 мм), минимум – тропические и полярные широты (менее 200 мм); умеренные широты: 300 – 600 мм
- **Над океаном:** максимум – субэкваториальные и тропические широты (1800 – 2000 мм), минимум – полярные широты (менее 500 мм); экваториальные широты: 1000 – 1200 мм, умеренные широты: 600 – 1000 мм.





## Испаряемость

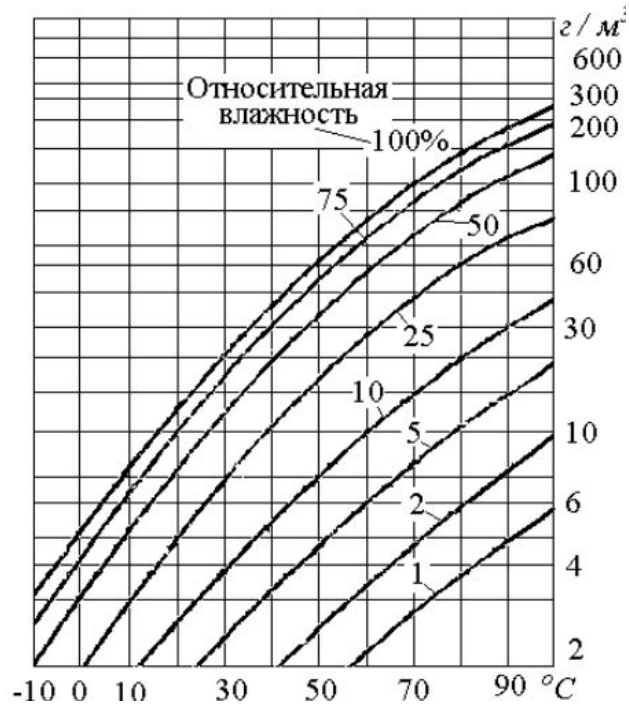
- **На суше:** максимум – тропические пустыни (более 2000 мм), минимум – полярные широты (менее 200 мм);
- **Над океаном:** так же, как испарение



Масштаб 1:150 000 000 (в 1 см 1500 км)

1500 0 1500 3000 4500 6000 7500 км

## Зависимость абсолютной влажности от температуры и относительной влажности



Давление и плотность в.п. убывают с высотой быстрее (даже значительно быстрее), чем общие давление и плотность воздуха, т.к. в.п. постоянно поступает в атмосферу снизу и, распространяясь вверх, конденсируется в более высоких слоях вследствие понижения температуры = в нижних слоях его больше по отношению к сухому воздуху, чем в верхних.

Упругость насыщ. убывает еще

## Изменение абсолютной и относительной влажности с высотой над поверхностью Земли

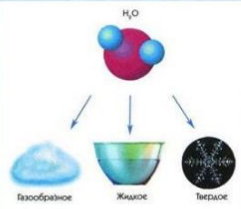


Половина всего водяного пара приходится на нижние 1,5  $\text{км}$  и свыше 99% — на тропосферу

В горах влагосодержание несколько больше, чем на тех же высотах в свободной атмосфере

В среднем над каждым квадратным метром земной поверхности в воздухе содержится около 28,5  $\text{кг}$  водяного пара.

Общий вес воздуха над каждым квадратным метром земной поверхности при среднем атмосферном давлении свыше 10 т, т. е. больше в 300 раз.

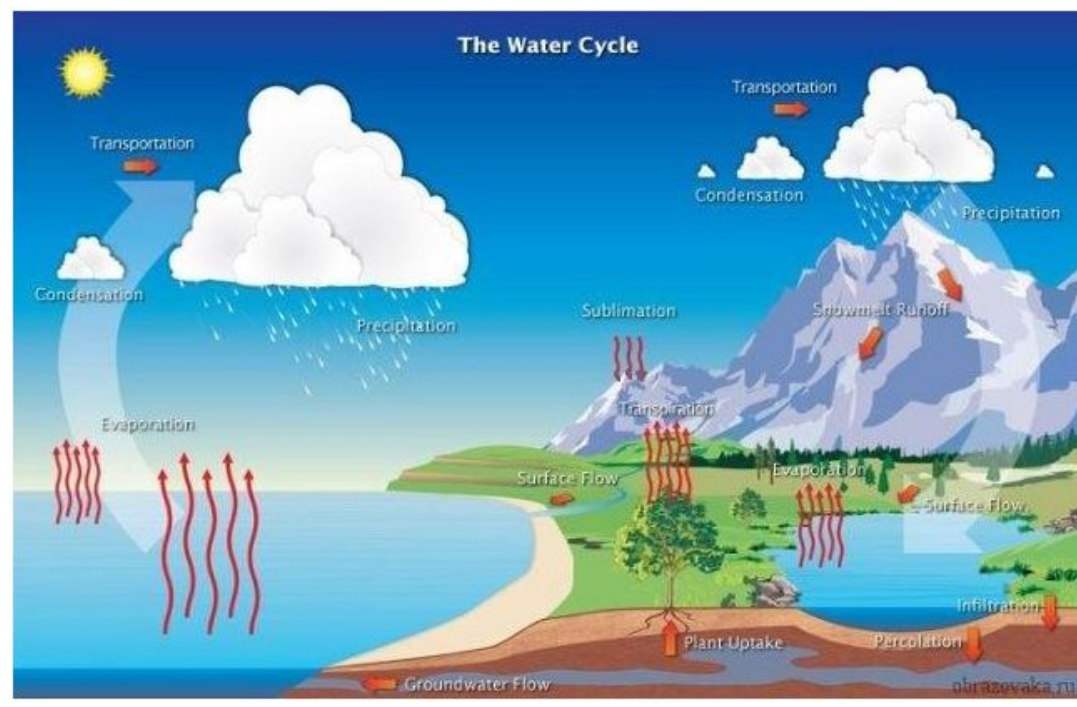


**Влагооборот** – непрерывный взаимообмен влагой между атмосферой и подстилающей поверхностью, перенос её реками, воздушными и морскими течениями из одних районов в другие

## ВЛАГООБОРОТ – КЛИМАТООБРАЗУЮЩИЙ ПРОЦЕСС

### Влагооборот

- ✓ испарение
- ✓ конденсация
- ✓ выпадение осадков
- ✓ СТОК



**Конденсация** - переход водяного пара, находящегося в воздухе, в жидкое или твердое состояние

**Сублимация** - непосредственное превращение водяного пара в лед

**Испарение** - поступление водяного пара в атмосферу вследствие отрыва наиболее быстро движущихся молекул с поверхности воды, снега, льда, влажной почвы, капелек и кристаллов в атмосфере

**Транспирация** - испарение растительностью

Физическое испарение

Суммарное испарение

# ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

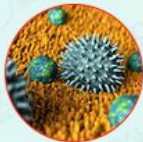
## ПОНИЖЕННАЯ ВЛАЖНОСТЬ



Сухая кожа



Снижение иммунитета



Повышение активности вирусов

## ПОВЫШЕННАЯ ВЛАЖНОСТЬ



Риск респираторными заболеваниями



Размножение патогенных микроорганизмов

!! вода составляет 50—80% тела большинства организмов

Для человека гигиеническая норма: относительная влажность воздуха 40—60%, допустимые значения — 30—70%.

Воздух сухой - менее 30%, умеренно влажный — от 71 до 85%, сильно влажный — более 85%

## ХОЛОДНО

Температура; 22°  
Влажность: 20 %

40.0° C



30.0° C



Если воздух сухой, то вы чувствуете холод даже при более высокой температуре воздуха

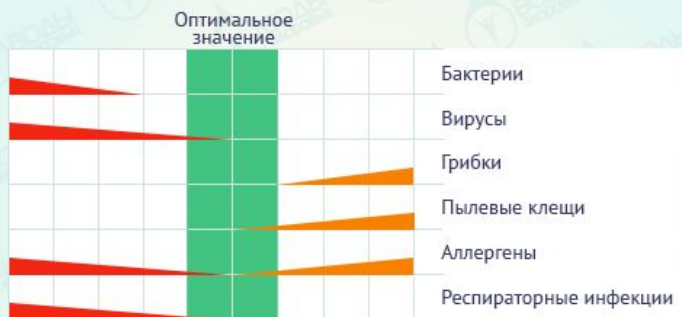
## ТЕПЛО

Температура; 22°  
Влажность: 50 %



При оптимальной влажности воздуха вы чувствуете себя комфортно даже при более низкой температуре

# ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА



10 20 30 40 50 60 70 80

Относительная влажность воздуха в помещении, %

Толщина красной и оранжевой линии показывает число отрицательных эффектов в атмосфере при изменении влажности



## **Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет:**

### **•а) основная литература:**

- Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология, 2001. (и др.годы издания)- 528 с.
- Матвеев Л.Т. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. - С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2000. 778 с.
- Семенченко Б.А. Физическая метеорология. М.: «Аспект Пресс», 2002. 415 с.
- Тверской П.Н. Курс метеорологии / Н.П. Тверской.-Л.: Гидрометеиздат, 1962.-700 с.
- Рыбакова Ж.В. Физическая метеорология (отдельные разделы): учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. 363 с.

### **•б) дополнительная литература:**

- Русин И.Н., Арапов П.П. Основы метеорологии и климатологии. Курс лекций - СПб.: изд. Р Г Г М У , 2008. - 199 с.
- Хабутдинов Ю.Г., Шанталинский К.М., Николаев А.А. Учение об атмосфере: Учеб. пособие. – Казань: Казанский ГУ, 2010. 257 с.
- Моргунов В.К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений: Учебник / В.К. Моргунов. – Ростов/Д.: Феникс. – Новосибирск: Сибирское соглашение, 2005. 331 с.
- Варбанец Т.В. Метеорология: Учеб. пособие. – Одесса: Феникс, 2008. 257 с.
- Рыбакова Ж.В., Блинкова В.Г. Учебное пособие по решению задач в курсах «Физическая метеорология» и «Общая физика»: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного ун-та, 2015. 286 с.
- Рыбакова Ж.В. Облака. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. 176 с.

### **•в) ресурсы сети Интернет:**

- Официальный сайт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) <http://www.meteorf.ru/>
- Официальный сайт Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [http://www.wmo.int/pages/visitors/index\\_ru.html](http://www.wmo.int/pages/visitors/index_ru.html)
- Официальный сайт Департамента Росгидромета по СФО: <https://drsfo.ru>