

Лекция 16
Транспорт воды в растении

**Людмила Алексеевна
Барахтенова,
Доктор биологических наук,
профессор**

Основные вопросы

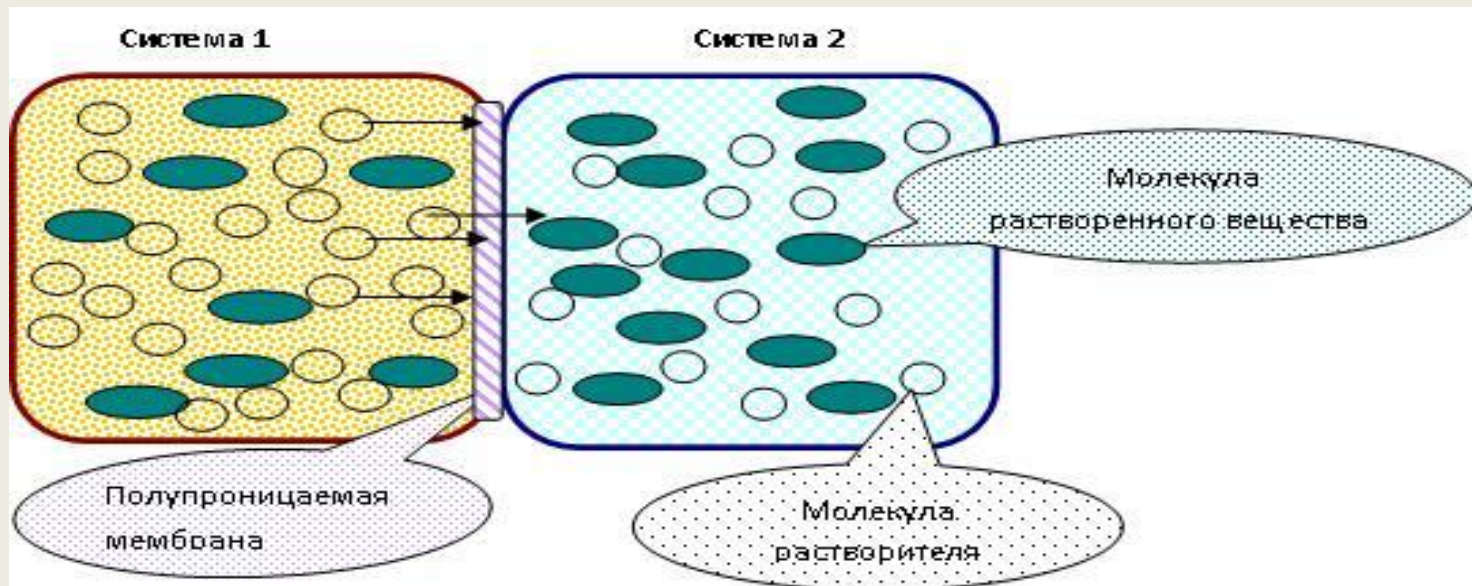
- Водный баланс растений, понятие, общая характеристика
- Механизмы поступления воды
- Показатели транспорта воды (водный потенциал, осмотический потенциал, потенциал давления, матричный потенциал, условия водного режима)
- Поступление воды в растение, роль корневой системы (симпласт, апопласт). Механизмы подъема воды
- Транспирация, типы, этапы и суточный ход. Влияние внешних факторов на транспирацию
- Верхний и нижний концевые двигатели. Взаимосвязи показателей водного режима и фотосинтеза
- Заключение

Водный баланс растений- это

*непрерывно идущие два процесса —
поступление и испарение воды.*

- Для нормального роста и развития растений необходимо, чтобы расход воды примерно соответствовал приходу,
- Приспособления для сохранения водного баланса :
 - к поглощению воды (развитая корневая система),
 - к передвижению воды (проводящая система),
 - к сокращению испарения (система покровных тканей и система автоматически закрывающихся устьичных отверстий).

Поступление воды



Растительная клетка –осмотическая система.

Осмоз наблюдается при наличии двух систем с различной концентрацией веществ.

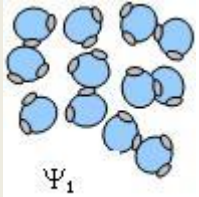
По законам термодинамики выравнивание концентраций происходит за счет вещества, для которого мембрана более проницаема.

Выравнивание концентраций в системе 1 и 2 возможно только за счет перемещения воды.

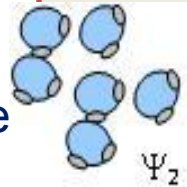
В системе 1 концентрация воды выше, поэтому поток воды направлен от системы 1 к системе 2.

Показатели транспорта воды.

1. Водный потенциал



- **Водный потенциал (Ψ_v) – показатель термодинамического состояния воды.** Молекулы воды обладают кинетической энергией, в жидкости и водяном паре они беспорядочно движутся.



- **Водный потенциал больше в той системе, где выше концентрация молекул и больше их общая кинетическая энергия.** Максимальным водным потенциалом обладает чистая (дистиллированная) вода. Водный потенциал такой системы условно принят за нуль.

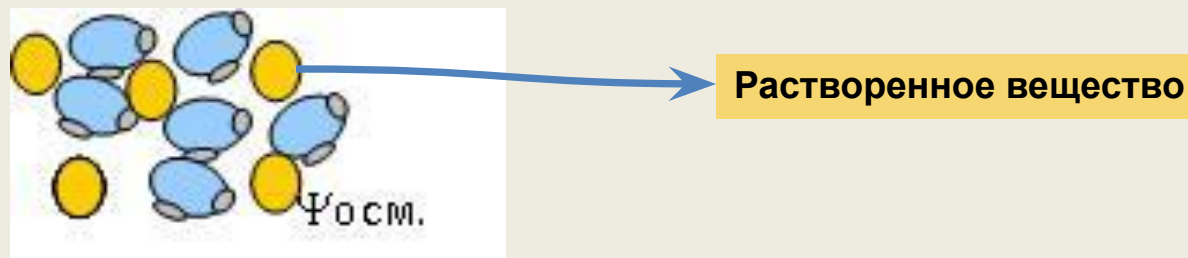
- **Единицей измерения водного потенциала являются единицы давления: атмосферы, паскалы, бары:**

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 \text{ (Н- ньютон);}$$

$$1 \text{ бар} = 0,987 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа};$$

$$1 \text{ атм} = 1,0132 \text{ бар}; 1000 \text{ кПа} = 1 \text{ МПа}$$

2. Осмотический потенциал



При растворении в воде другого вещества:

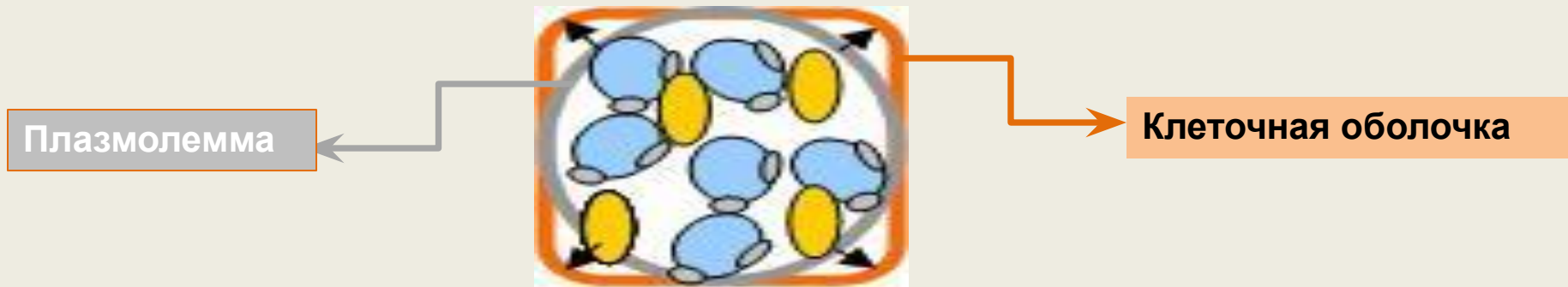
- понижается концентрация воды,
- уменьшается кинетическая энергия молекул воды,
- снижается водный потенциал.

Количественно это понижение выражают величиной, которая называется **ОСМОТИЧЕСКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ** ($\Psi_{осм.}$).

Осмотический потенциал – это мера снижения водного потенциала за счет присутствия растворенных веществ.

Чем больше в растворе молекул растворенного вещества, тем ниже осмотический потенциал.

3. Потенциал давления



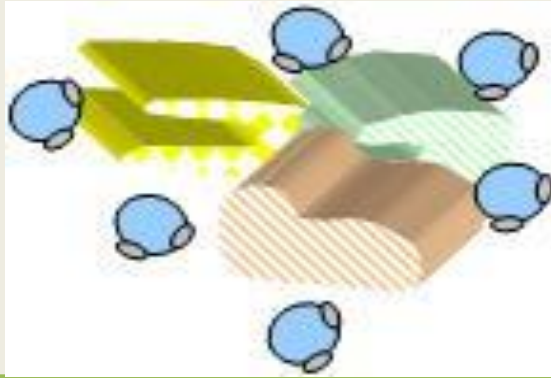
При поступлении воды в клетку:

- ее размеры увеличиваются,
- внутри клетки повышается гидростатическое давление,
- плазмалемма прижимается к клеточной стенке,

Клеточная оболочка оказывает противодействие, которое характеризуется **потенциалом давления ($\Psi_{\text{давл.}}$)** или гидростатическим потенциалом.

Он обычно положителен и тем выше, чем больше воды в клетке.

4. Матричный потенциал



- Вода в клетку может поступать также за счет сил набухания. Белки и другие вещества, входящие в состав клетки, имея положительно и отрицательно заряженные группы, притягивают диполи воды.
- К набуханию способны клеточная стенка, имеющая в своем составе гемицеллюлозы и пектиновые вещества, цитоплазма, в которой высокомолекулярные полярные соединения составляют около 80% сухой массы.
- Вода проникает в набухающую структуру путем диффузии, движение воды идет по градиенту концентрации.
- Сила набухания – это матричный потенциал ($\Psi_{\text{матр.}}$), он:
 - зависит от наличия высокомолекулярных компонентов клетки,
 - всегда отрицательный,
 - имеет большое значение при поглощении воды структурами, в которых отсутствуют вакуоли (семена, клетки меристем).

5. Условия водного режима

$$\Psi_{\text{в.}} = \Psi_{\text{осм.}} -$$

- вода не давит на клеточную оболочку,
- состояние плазмолиза или увядания.

$$\Psi_{\text{в.}} = \Psi_{\text{осм.}} - \Psi_{\text{давл.}} -$$

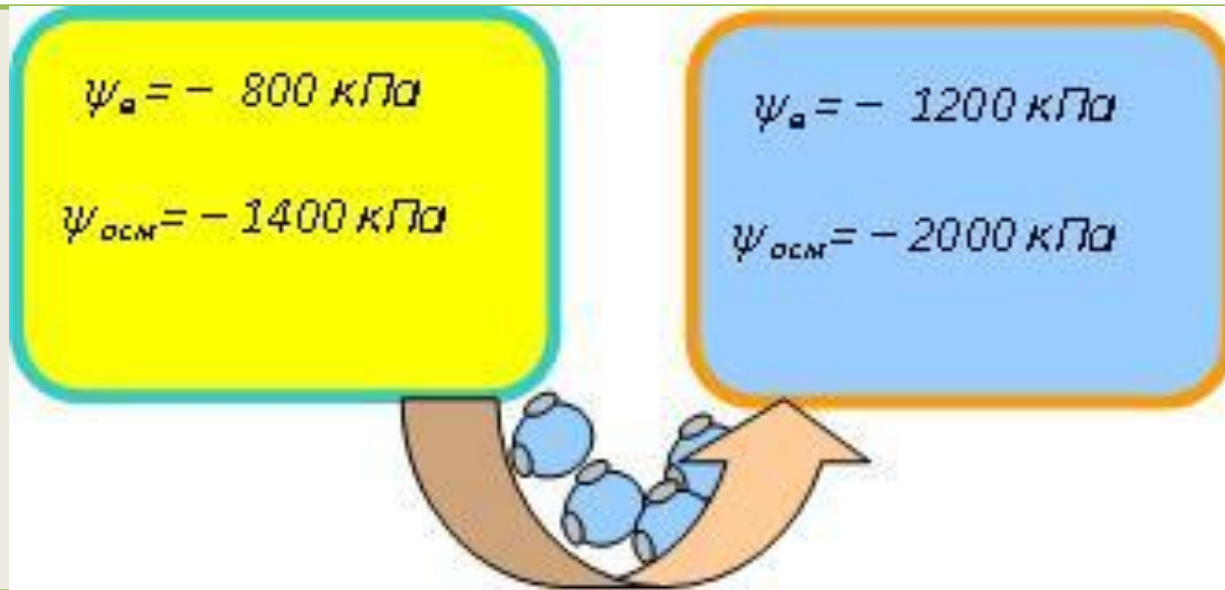
- противодействие клеточной оболочке,
- вода поступает в клетку.

$$- \Psi_{\text{осм.}} = \Psi_{\text{давл.}}, \Psi_{\text{в.}} = 0 -$$

- клеточная оболочка растягивается до предела,
- осмотический потенциал целиком уравнивается противодействием клеточной оболочке,
- водный потенциал становится равным нулю,
- вода в клетку перестает поступать.



6. Резюме:



Вода всегда поступает в сторону более отрицательного водного потенциала: от той системы, где энергия больше, к той системе, где энергия меньше.

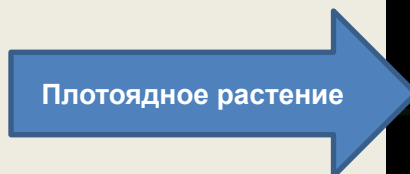
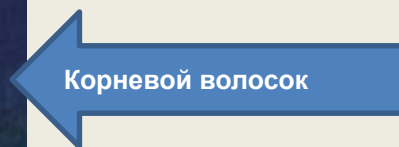
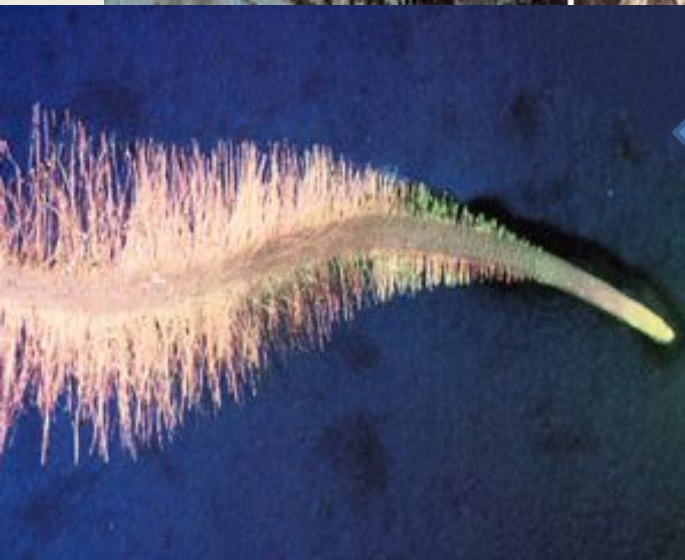
Поступление воды в растение

У сосудистых растений передвижение веществ осуществляется по двум системам: ксилеме (вода и минеральные соли) и флоэме (органические вещества).

Передвижение веществ:

- **по ксилеме** направлено от корней к надземным частям растения;
- **по флоэме** питательные вещества движутся от листьев к корням.

Корни, морфология



Корень, строение

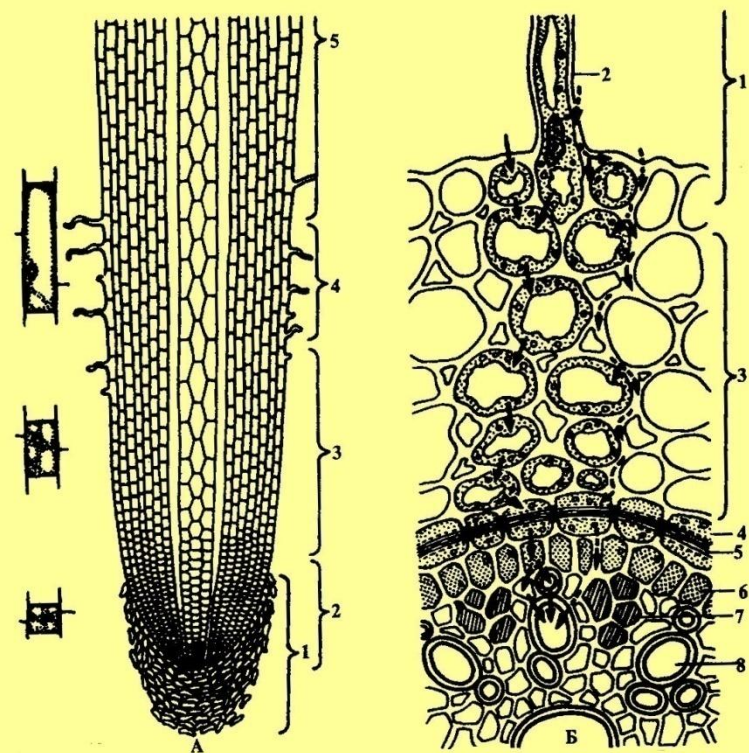
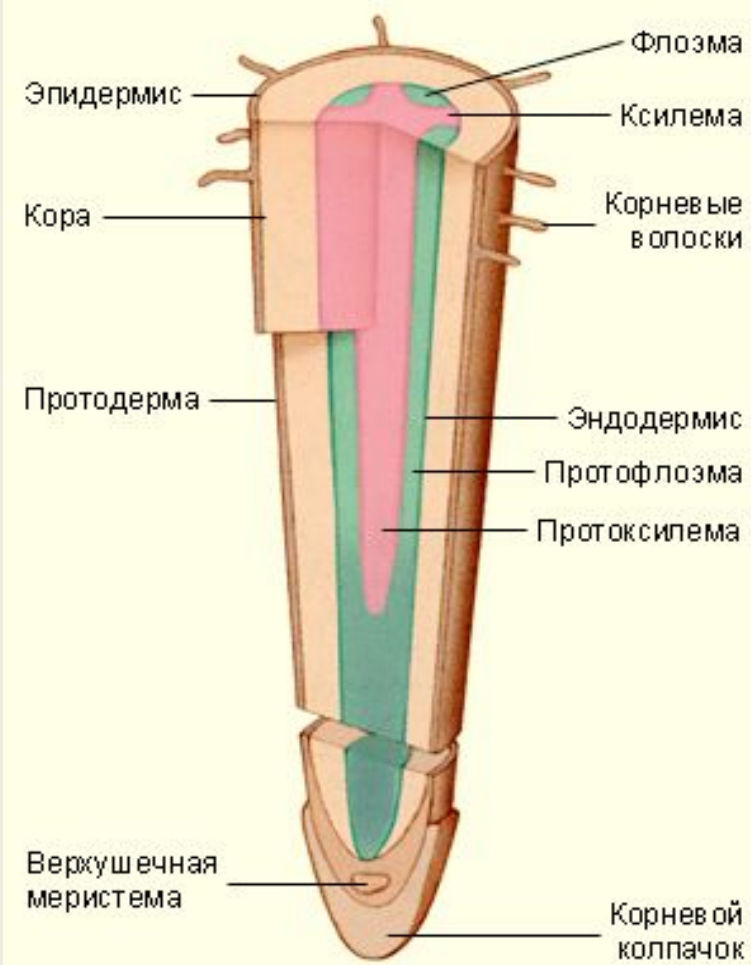


Схема строения корня:

А — продольный разрез: 1 — корневой чехлик; 2 — меристема; 3 — зона растяжения; 4 — зона корневых волосков; 5 — зона ветвления;

Б — поперечный разрез (по М.Ф. Даниловой): 1 — ризодерма; 2 — корневой волосок; 3 — паренхима; 4 — эндодерма; 5 — пояски Каспари; 6 — перицикл; 7 — флоэма; 8 — ксилема.

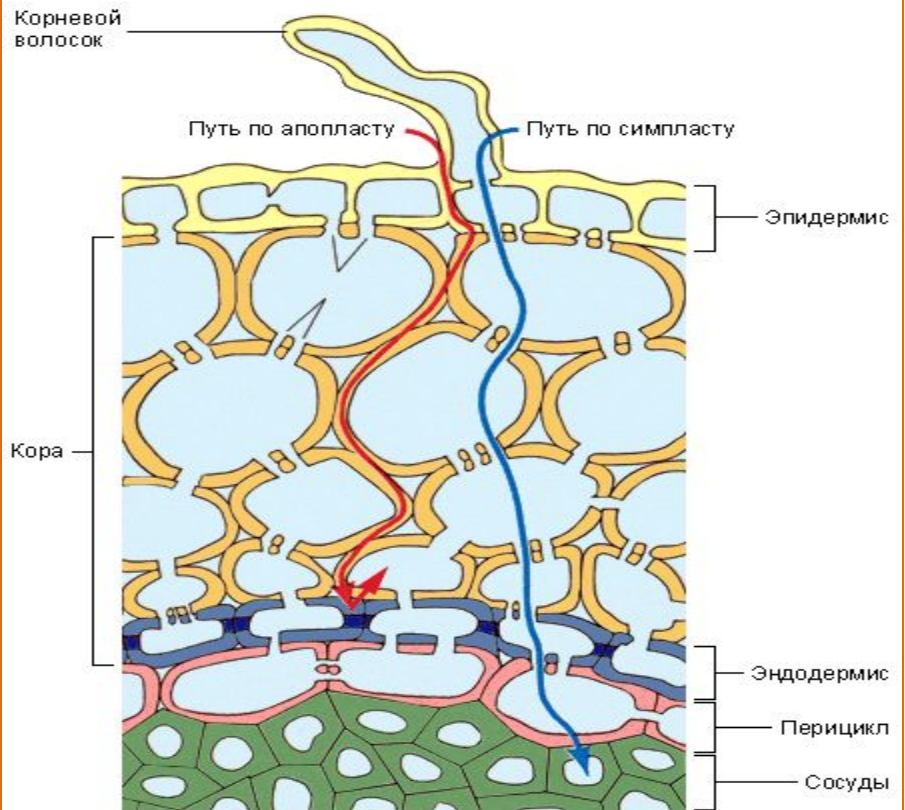
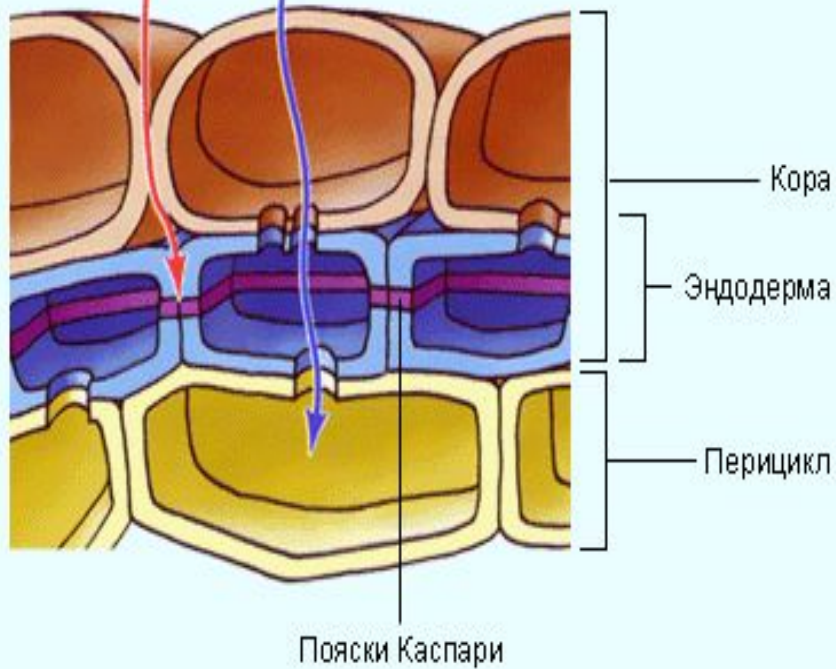
Стрелки — пути передвижения веществ, поглощаемых из наружного раствора. Сплошные стрелки — путь раствора по симпласту; прерывистые — по апопласту



Подъем воды, роль корня

апопласт

симпласт

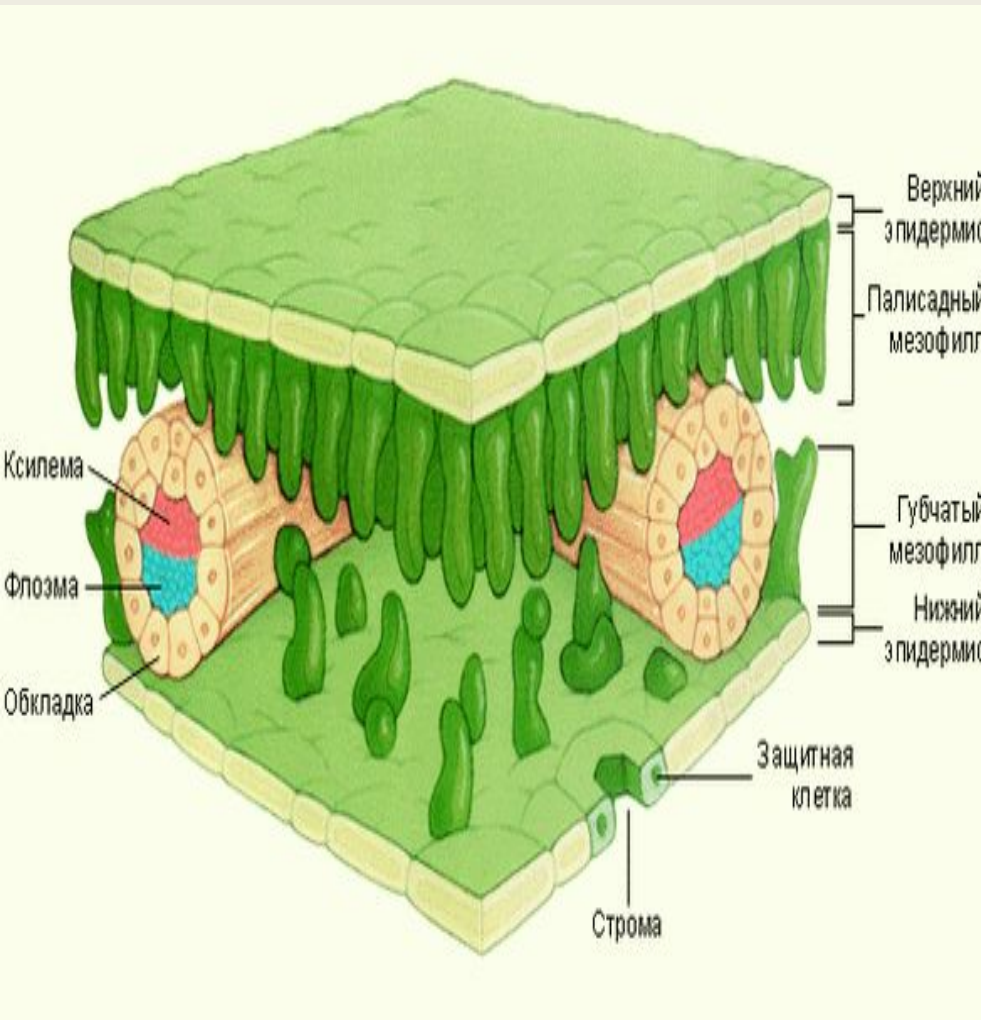


- Основная масса воды поглощается молодыми зонами корней растений в области корневых волосков – трубчатых выростов эпидермиса. Благодаря им значительно увеличивается всасывающая воду поверхность.
- Вода поступает в корень за счёт осмоса и движется вверх к ксилеме **по апопласту** (по клеточным стенкам), и **по симпласту** (по цитоплазме и плазмодесмам), а также через вакуоли.
- В клеточных стенках имеются полоски, называемые **поясками Каспари**. Они состоят из водонепроницаемого суберина, препятствуют продвижению воды и растворённых веществ. В этих местах вода вынуждена проходить через плазматические мембраны клеток; таким образом растения защищаются от проникновения токсичных веществ, патогенных грибов и т. п.

Механизмы подъема воды, двигатели

- 1. Первая сила подъема воды по ксилеме - верхний концевой двигатель - испарение воды в листьях:** в процессе испарения в кроне образуется недостаток воды. Скорость подъема воды составляет около 1 м/ч (до 8 м/ч в высоких деревьях); чтобы поднять воду к вершине высокого дерева, требуется давление порядка 40 атм. Капиллярные эффекты способны поднять воду на высоту не более 3 м.
- 2. Вторая важная сила- корневое давление.** Оно составляет 1–2 атм. (в исключительных случаях – до 8 атм.). Доказательства корневого давления:
 - гуттация и плач** - связаны с наличием одностороннего тока воды через корневые системы, не зависящего от транспирации
 - Листья растений, клетки которых насыщены водой, в условиях высокой влажности воздуха, препятствующей испарению, выделяют капельно-жидкую воду с небольшим количеством растворенных веществ — **гуттируют**. Выделение жидкости идет через специальные водные устьица — гидатоды. Выделяющаяся жидкость — **гутта**. – результат корневого давления
 - Если срезать побеги растения и к срезанному концу присоединить стеклянную трубку, то по ней будет подниматься жидкость - это — вода с растворенными веществами, получившая название **пасоки («плач»)**.
- 3. Основные механизмы подъема— когезия** (сцепление молекул воды между собой), и **адгезия** - сцепление молекул воды с другими веществами.

Испарение воды (транспирация)

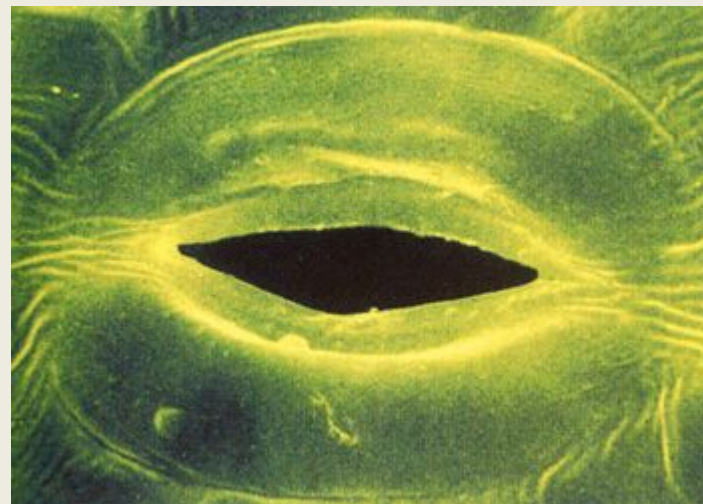


Попадая по ксилеме в листья, вода и минеральные вещества распределяются через разветвлённую сеть проводящих пучков по клеткам.

Движение по клеткам листа осуществляется, как и в корне, тремя способами: по апопласту, симпласту и вакуолям.

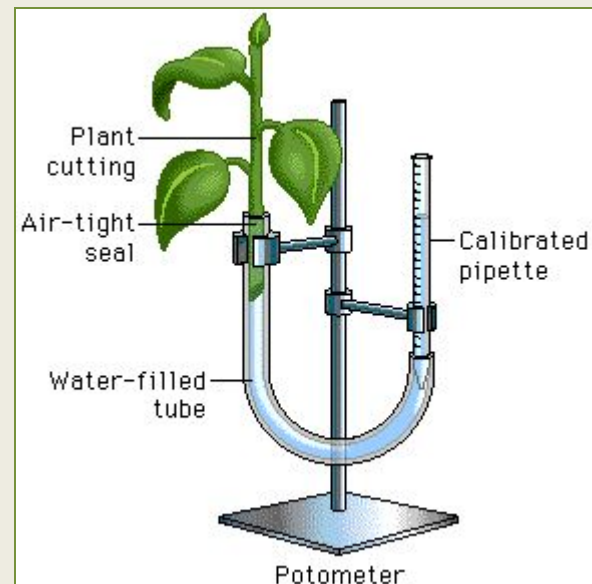
Растение использует менее 1 % поглощаемой им воды.

Испарение воды



Основная масса воды испаряется :
через восковый слой на поверхности листьев и стеблей – **кутикулу** (около 10 % воды)
через особые поры – **устьица** (90 % воды).

Травянистые растения теряют в день около литра воды, а у больших деревьев эта цифра может доходить до сотен литров.



Транспирация складывается из двух процессов:

- 1. Передвижения воды** в листе из сосудов ксилемы **по симпласту**, преимущественно, по клеточным стенкам, так как в стенках транспорт воды встречает меньшее сопротивление.
- 2. Испарения воды** из клеточных стенок в межклетники и подъястьичные полости с последующей диффузией в атмосферу через устьичные щели.

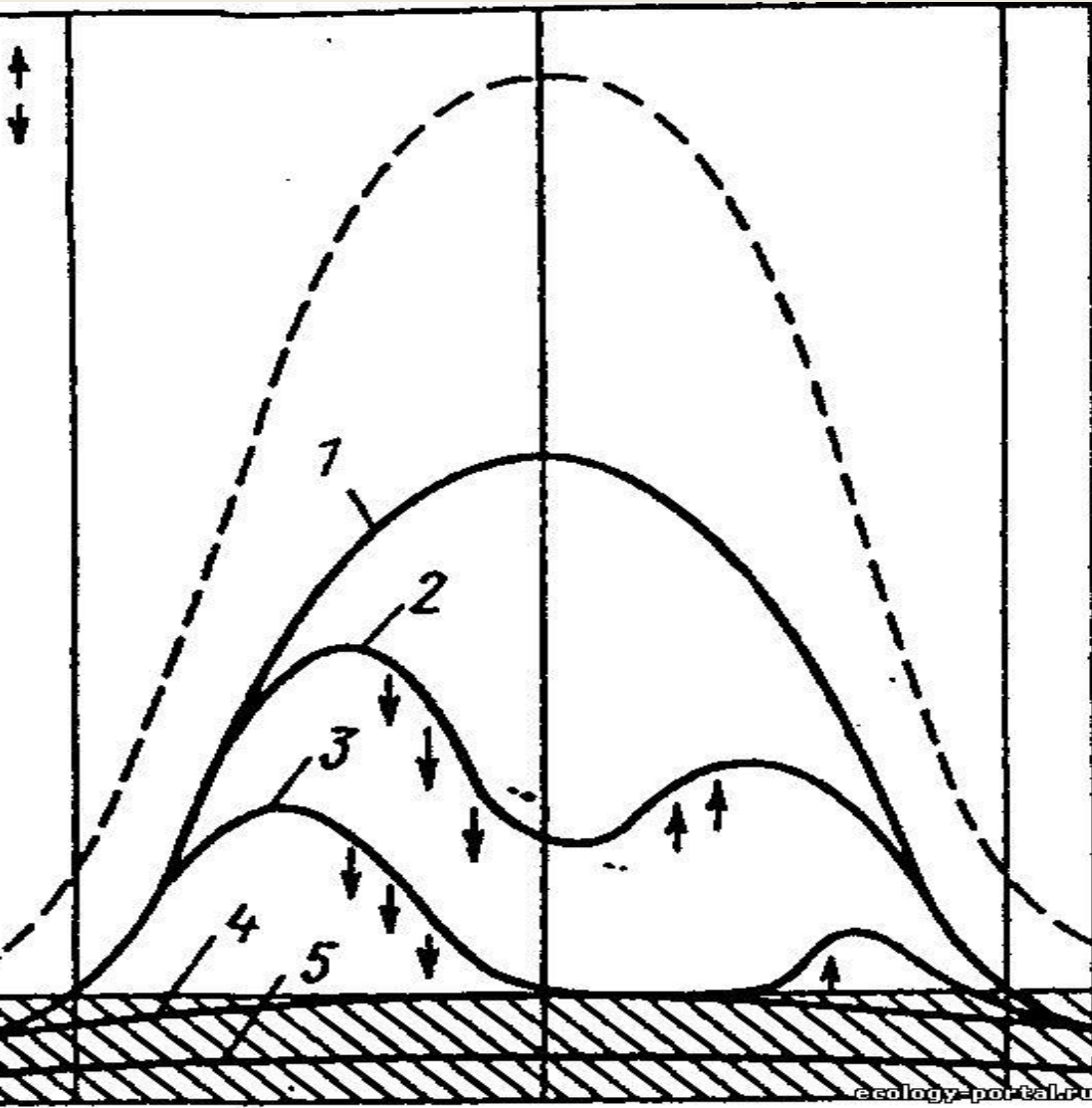
Устьичная транспирация

- Устьица представляют собой щель в подустьичную полость, окаймленную двумя замыкающими клетками серповидной формы.
- Устьица находятся на обеих сторонах листа, но есть виды растений, у которых устьица располагаются только на нижней стороне листа.
- Количество устьиц колеблется от 50 до 500 на 1 мм².
- Транспирация через устьица идет почти с такой же скоростью, как и с поверхности чистой воды. Это объясняется законом И. Стефана: **через малые отверстия скорость диффузии газов пропорциональна не площади отверстия, а диаметру или длине окружности**. Поэтому, хотя площадь устьичных отверстий мала по отношению к площади всего листа (0,5-2 %), испарение воды через устьица идет очень интенсивно.

ЭТАПЫ *устьичной* ТРАНСПИРАЦИИ

- **Первый этап** — переход воды из клеточных оболочек (капельножидкое состояние) в межклетники (парообразное состояние) – это собственно процесс испарения: отрыв молекул воды с поверхности клеточных стенок.
 - **Регуляция** (внеустьичная): вовлечение воды в обменные процессы. Соотношение свободной воды к связанной падает, водоудерживающая сила растет, интенсивность испарения уменьшается.
- **Второй этап** — выход паров воды из межклетников или через кутикулу, или, через устьичные щели, 80—90% от всего испарения листа
 - **Регуляция:** степень открытости устьиц, а также факторы влияющие на открытость устьиц.
- **Третий этап** — диффузия паров воды от поверхности листа в более далекие слои атмосферы.
 - **Регуляция:** условия внешней среды.

Суточный ход транспирации



1. Транспирация без ограничения;
2. транспирация с полуденным снижением из-за сужения устьиц;
3. то же, при полном закрытии устьиц;
4. полное исключение устьичной транспирации из-за длительного закрывания устьиц;
5. снижение кутикулярной транспирации из-за изменения проницаемости мембран.

Стрелки, направленные вниз, — закрывание устьиц; стрелки, направленные вверх, — открывание устьиц.

Пунктир — дневной ход испарения со свободной водной поверхности.
Штриховка — область кутикулярной транспирации

Кутикулярная транспирация

- **Снаружи листья** имеют однослойный эпидермис, внешние стенки клеток которого **покрыты кутикулой и воском**, образующие эффективный барьер на пути движения воды.
- **На поверхности листьев часто развиты волоски**, которые также влияют на водный режим листа, так как снижают скорость движения воздуха над его поверхностью и рассеивают свет и тем самым **уменьшают потери воды за счет транспирации**.
- **Интенсивность кутикулярной транспирации варьирует** у разных видов растений.
- **Кутикулярная транспирация регулируется** главным образом толщиной и целостностью кутикулы и других защитных покровных слоев на поверхности листьев в ряду:

молодые → зрелые → стареющие.

Значение транспирации

- 1. Защита от перегрева.** Температура сильно транспирирующего листа может примерно на 7°C быть ниже температуры листа завядающего, нетранспирирующего. Это особенно важно в связи с тем, что перегрев, разрушая хлоропласты, резко снижает процесс фотосинтеза (оптимальная температура для процесса фотосинтеза $20\text{—}25^{\circ}\text{C}$). Именно благодаря высокой транспирирующей способности многие растения хорошо переносят повышенную температуру.
- 2. Создание непрерывного тока воды из корневой системы к листьям,** который связывает все органы растения в единое целое.
- 3. Передвижение растворимых минеральных и частично органических питательных веществ,** при этом чем интенсивнее транспирация, тем быстрее идет этот процесс.

Количественные характеристики транспирации

1. **Интенсивность транспирации** — это количество воды, испаряемой растением в граммах за единицу времени в часах единицей поверхности в дм^2 . Эта величина колеблется от 0,15 до 1,5.
2. **Транспирационный коэффициент** — это количество воды в граммах, испаряемой растением при накоплении им 1 грамма сухого вещества.
3. **Продуктивность транспирации** — это величина, обратная транспирационному коэффициенту и равна количеству сухого вещества в граммах, накопленного растением за период, когда оно испаряет 1 кг воды.
4. **Относительная транспирация** — это отношение количества воды, испаряемой листом, к количеству воды, испаряемой со свободной водной поверхности той же площади за один и тот же период времени.
5. **Экономность транспирации** — это количество испаряемой воды в мг на 1 кг воды, содержащейся в растении.

Подсчитано, что с 1 га посева растений выделяется, в т.ч. у:

пшеницы - 2 тыс. т воды,

кукурузы - 3,2 тыс. т,

капусты - 8 тыс. т.

Влияние различных факторов на транспирацию

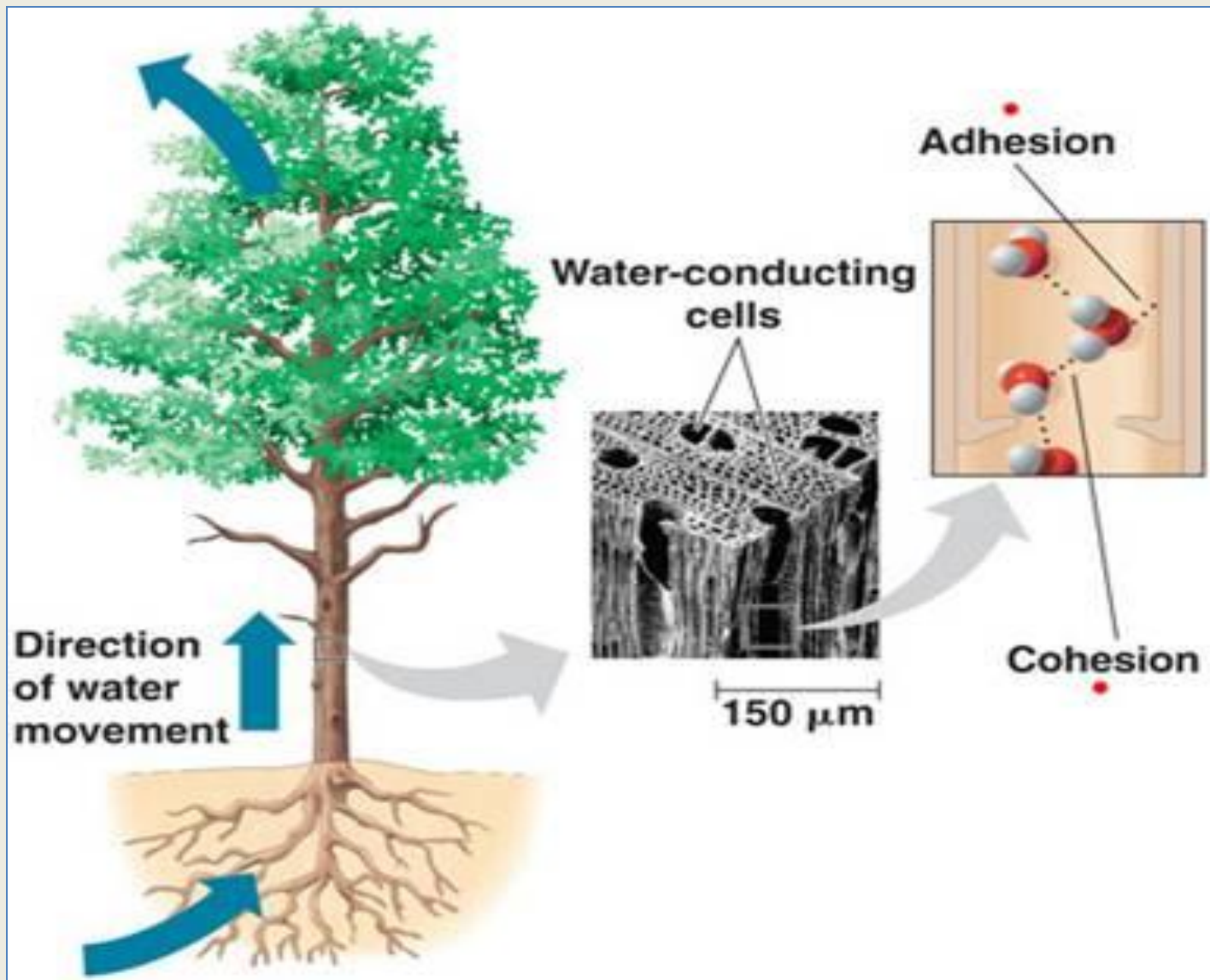
- **Свет.** На свету зеленые листья поглощают определенные участки солнечного спектра, повышается температура листа, и это вызывает усиление процесса транспирации. В связи с этим действие света на транспирацию проявляется тем сильнее, чем выше содержание хлорофилла. У зеленых растений даже рассеянный свет повышает транспирацию на 30—40%.
- **Влажность почвы.** С уменьшением влажности почвы транспирация уменьшается. Уменьшение содержания воды в растительном организме автоматически снижает процесс транспирации в силу устьичной регуляции.
- **Ветер** оказывает влияние на транспирацию, усиливая перенос насыщенного водой воздуха от поверхности листа. При ветре усиливается, прежде всего, кутикулярная транспирация.
- **Концентрации клеточного сока.** Молекулы воды удерживаются осмотическими силами. Чем концентрированнее клеточный сок, тем слабее транспирация. Интенсивность транспирации зависит от эластичности (способности к обратимому растяжению) клеточных стенок. Если клеточные стенки малоэластичны, то уже небольшая потеря воды приводит к сокращению объема клетки до минимума. В этот период клеточные оболочки не растянуты и не оказывают сопротивления, водный потенциал становится равным всей величине осмотического потенциала.

- **Величина листовой поверхности**, а также изменение соотношения корни/побеги. Чем больше развита листовая поверхность, больше побеги, тем значительнее общая потеря воды. Однако в процессе естественного отбора у растений выработалась компенсирующая способность к меньшему испарению с единицы поверхности листа (меньшая интенсивность транспирации) при увеличении листовой поверхности.
- **Фаза развития**. С увеличением возраста растений транспирация, как правило, падает. Высокая интенсивность испарения у молодых листьев может происходить за счет усиления кутикулярной транспирации, кутикула в этот период еще слабо развита.

Классификация растений в отношении суточного хода устьичных движений

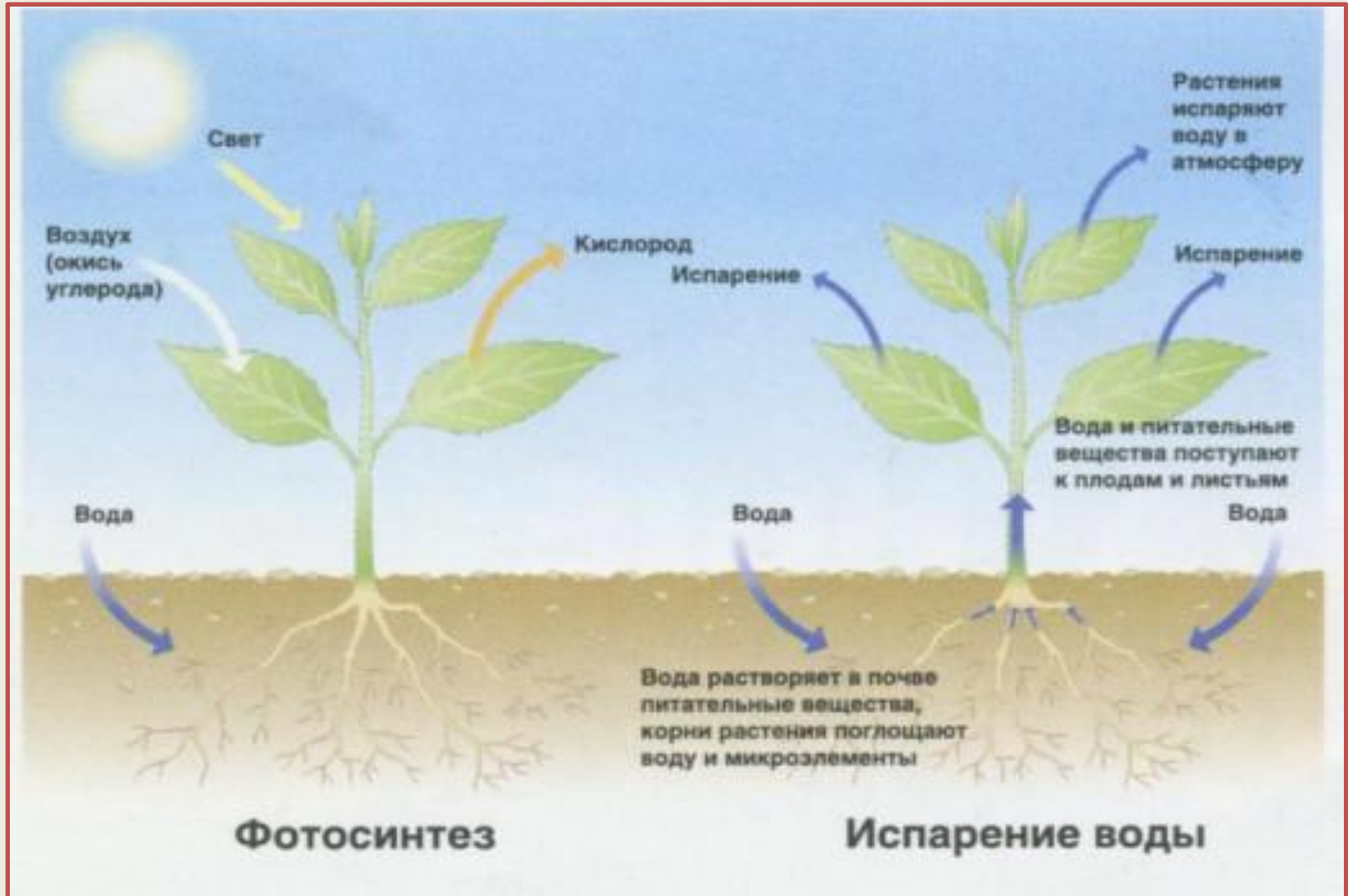
Английский исследователь Д. Лофтфельд разделил все растения :

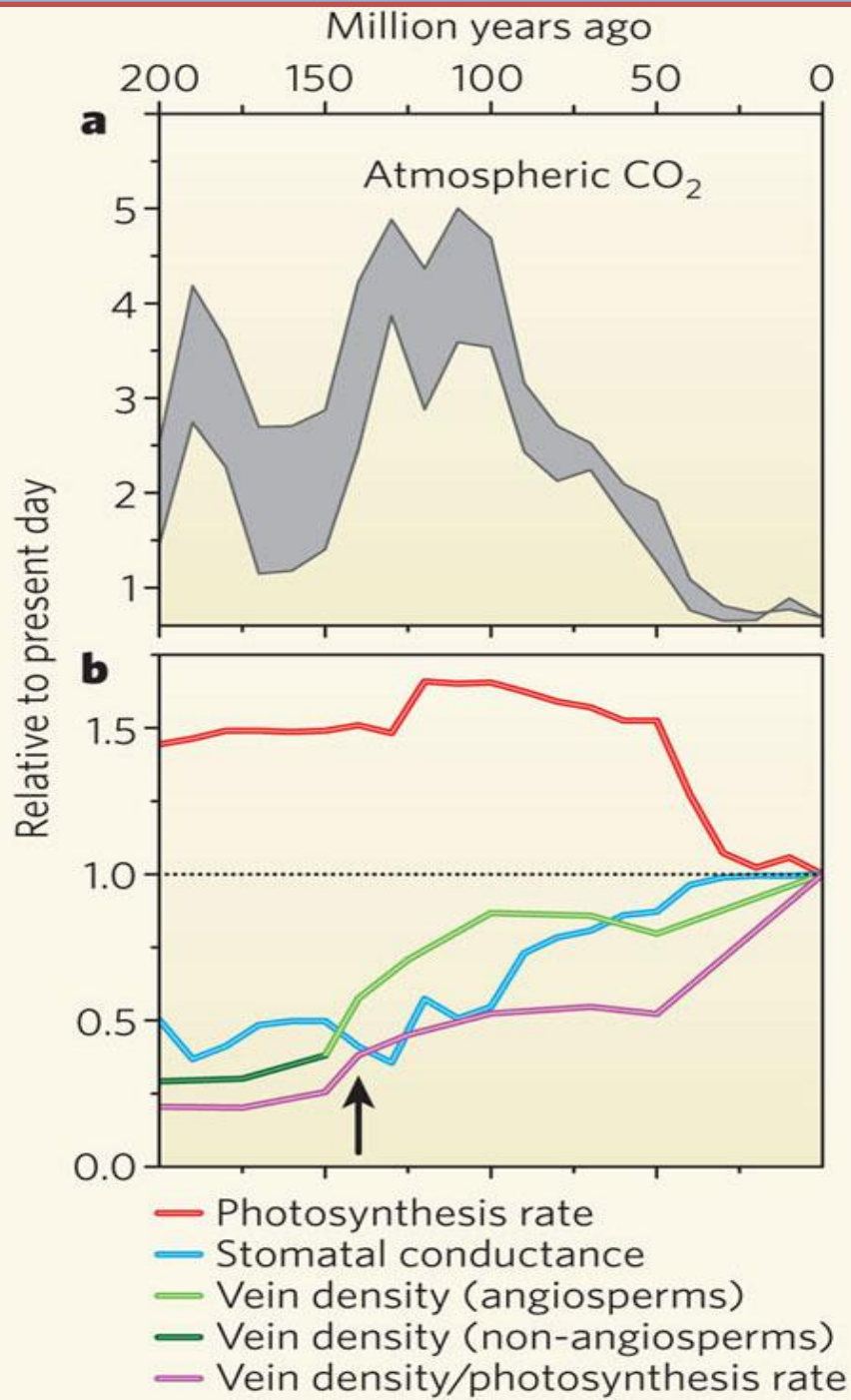
1. **Растения, у которых ночью устьица всегда закрыты.** Утром устьица открываются, и их дальнейшее поведение в течение дня зависит от условий среды. Мало воды — они закрываются, достаточно воды — открываются. К этой группе относятся в первую очередь хлебные злаки.
2. **Растения, у которых ночное поведение устьиц зависит от дневного.** Если днем устьица были закрыты, то ночью они открываются, если днем были открыты, то ночью закрываются. К этой группе принадлежат растения с тонкими листьями — люцерна, горох, клевер, свекла, подсолнечник.
3. **Растения с более толстыми листьями, у которых ночью устьица всегда открыты,** а днем, как и у всех остальных групп растений, открыты или закрыты в зависимости от условий (картофель, капуста).



Продвижение воды <http://hrebsstaff.ednet.ns.ca>

Взаимосвязи





a — изменение содержания CO₂ в атмосфере за последние 200 млн лет (в относительных величинах; современный уровень – 1). Область, выделенная *серым цветом*, — неопределенность оценок.

b — изменения относительно современного уровня (1.0):

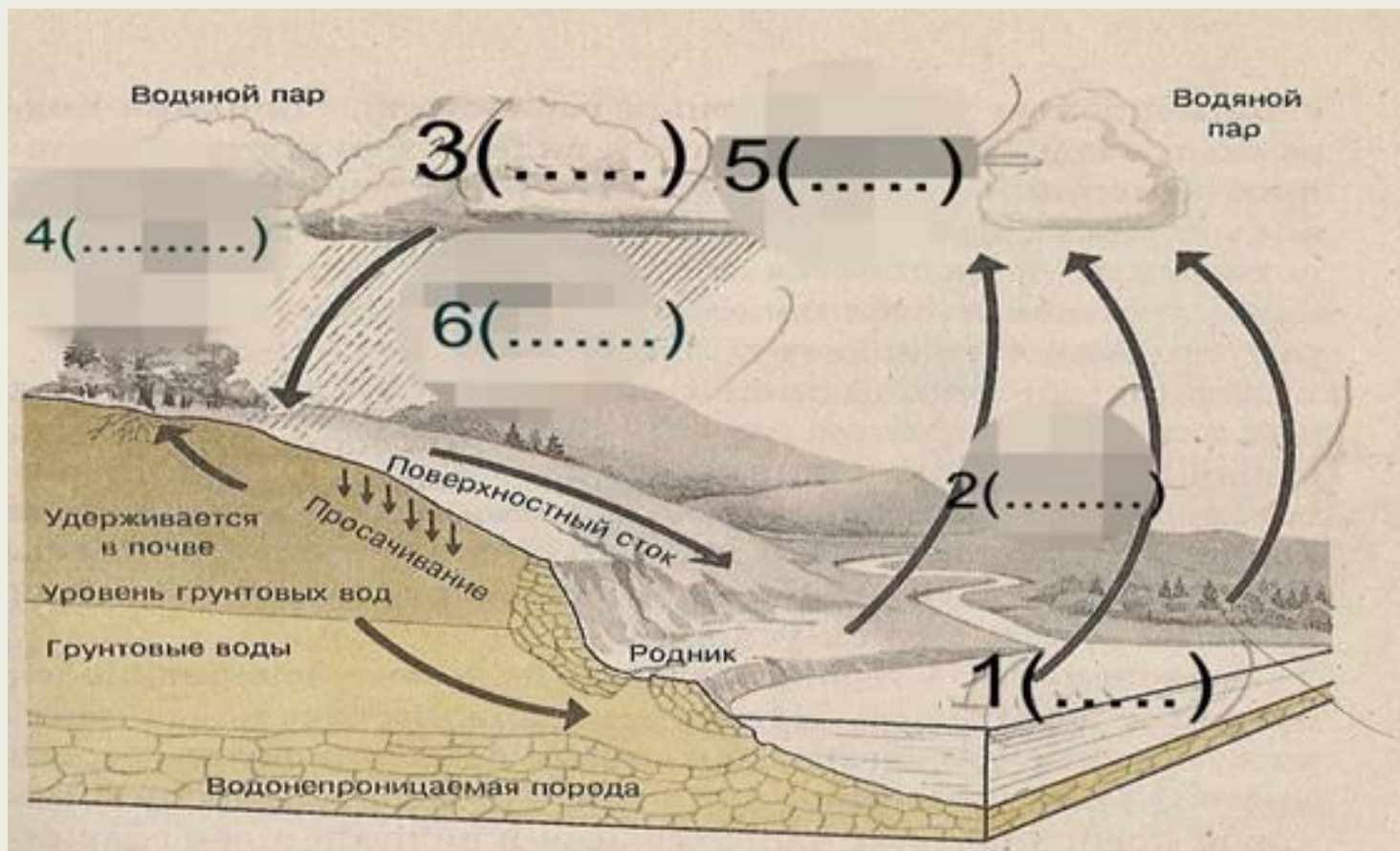
- скорости фотосинтеза (*красная линия*),
- проводимости устьиц (*голубая линия*),
- плотности жилкования у покрытосеменных (*светло-зеленая линия*) и других групп сосудистых растений (*темно-зеленая линия*),
- отношения плотности жилкования к скорости фотосинтеза (*фиолетовая линия*).

Стрелкой показано время начала быстрого развития покрытосеменных.

Рис. из статьи Beerling, Franks, 2010 // *Nature*. V. 464. P. 495–496

Круговорот воды в природе

<http://festival.1september.ru>



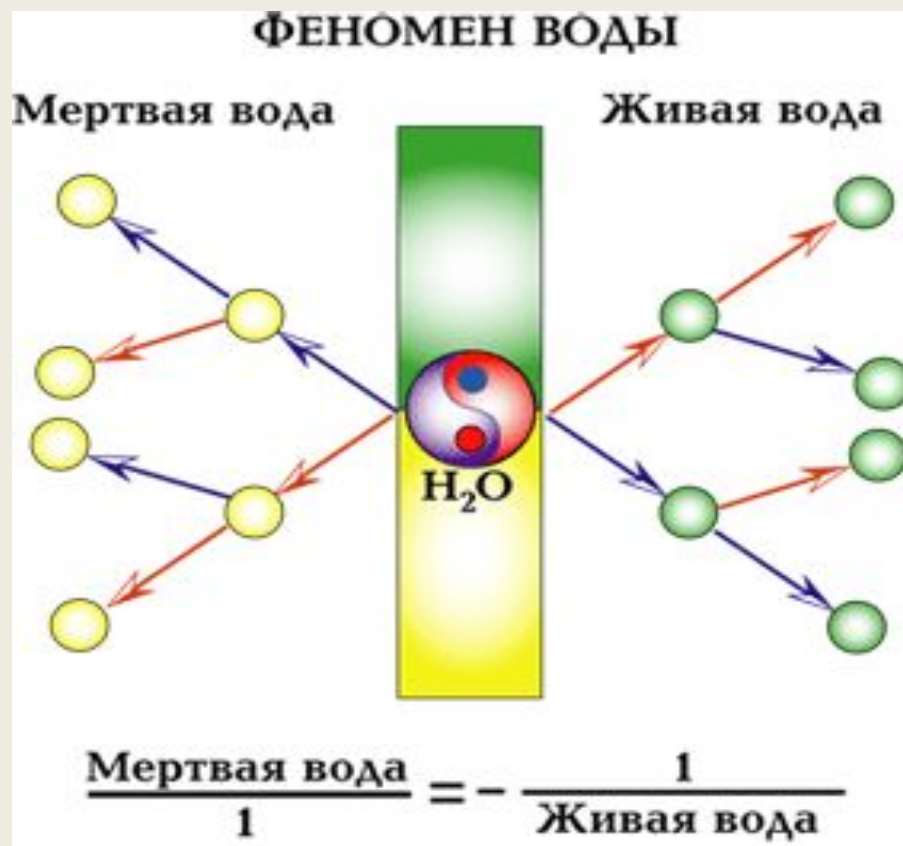
1. Любой водоем.
2. Лужа высохла до дна, будто не было вчера. О каком явлении идет речь? (*испарение*)
3. Белая вата, по небу плывет куда-то (*облака*)
4. Биологическое испарение у растений (*транспирация*)
5. Приходил, стучал по крыше, уходил никто не слышал (*дождь*)
6. Явление, при котором запотевают очки, когдаходишь из холодного помещения в теплое, или дышишь на зеркало, стекло (*конденсация*)

«Живая» и «Мертвая» вода...



Японец Масару Эмото фотографирует кристаллы воды после того, как в течение нескольких минут говорит над водой...

<http://www.milogiya2007.ru/pamiatvoda.htm>



Ромашка

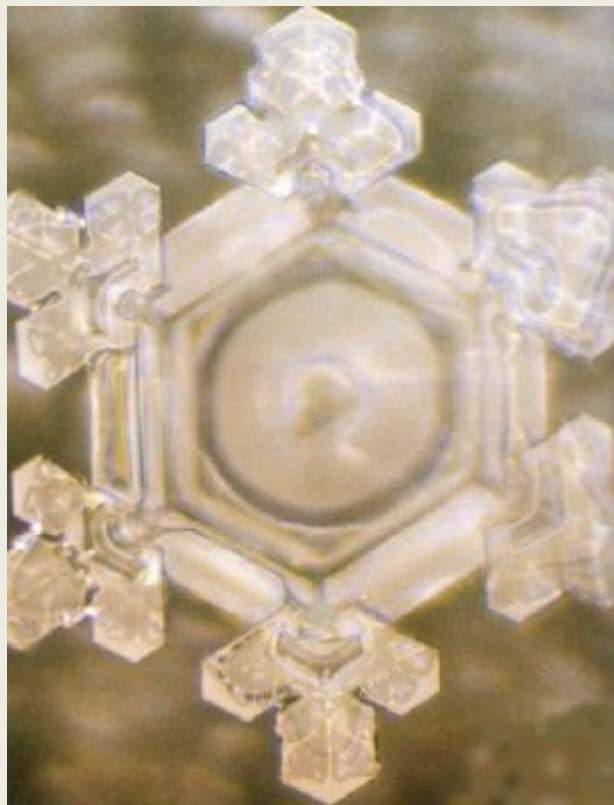
Картинка кристалла ромашковой воды



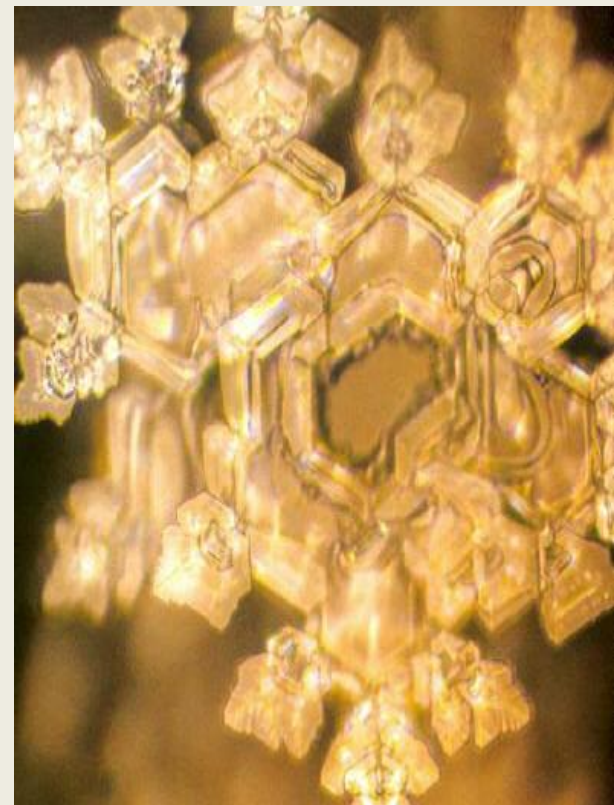
«Живая» и «мертвая» вода...?



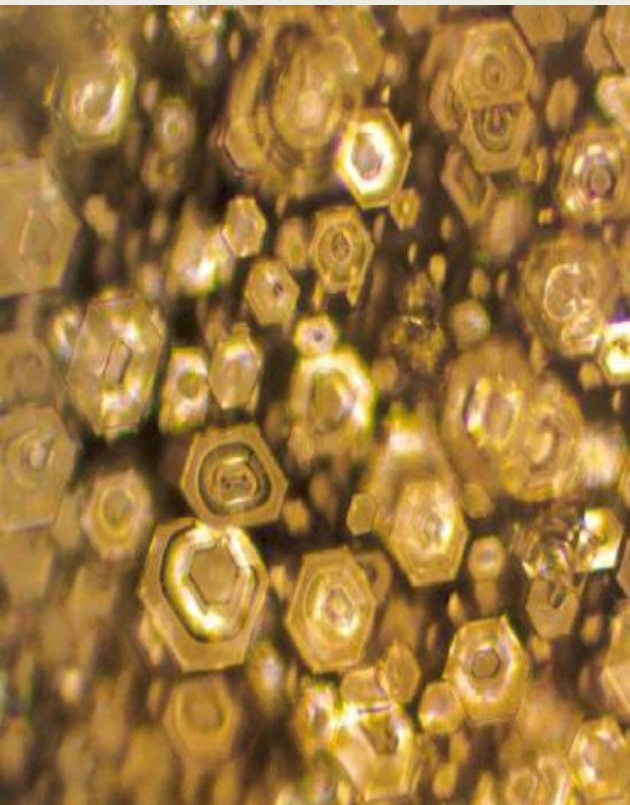
«Спасибо»



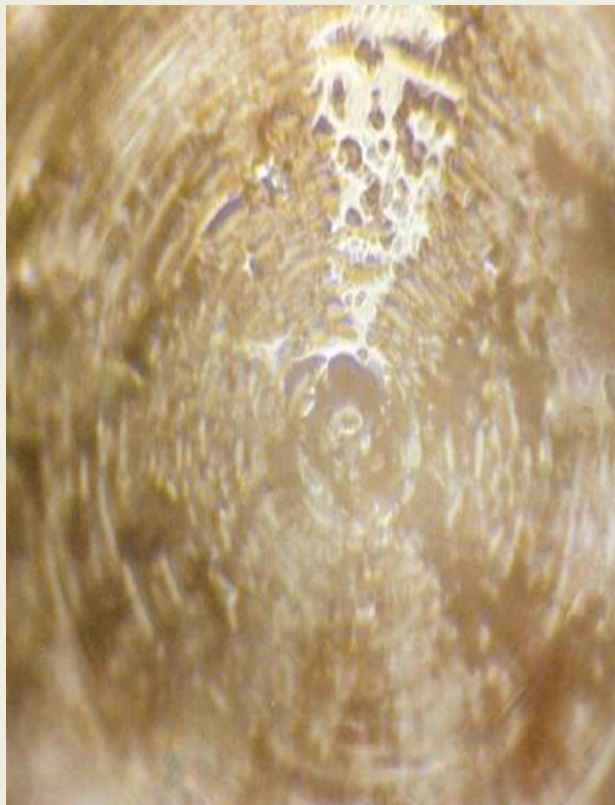
Музыка Баха



Музыка Шопена



Народная музыка



Молитва



Музыка тяжелого рока



«Я тебя ненавижу»

Японец Масару Эмото фотографирует кристаллы воды после того, как в течение нескольких минут говорит над водой. Он может говорить «Я тебя люблю», «Спасибо, вода», «Ты выздоровеешь» или «Я тебя ненавижу». Он может играть музыку или просто посылать воде какие-то мысли. После этого – фотография. **Мы их видели...**

Если мыли меняют структуру молекулы воды, что происходит с телом?