

Новые идеи и гипотезы

УДК 581.11.03: 532.132

Сверхтекучесть почвенной воды в капиллярной системе растений

Г. С. Ходаков

ГЕНРИХ СОЛОМОНОВИЧ ХОДАКОВ — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института горючих ископаемых РАН (ИГИ РАН). Область научных интересов: механохимия, дисперсные материалы, сверхтекучесть водных растворов в капиллярах пористых мембран.

119333 Москва, Ленинский пр., д.31, ИГИ РАН, тел. (495)955-47-81, E-mail hodakov-g@yandex.ru

Проблемы механизма водного режима растений

Механизм движения почвенной воды от корней к листе растений более века занимает внимание ботаников и биологов. Экспериментально измерены скорости движения воды по капиллярам деревьев разных пород, изучена структура ксилемы, флоэмы и камбия. Установлено, что 98% воды, поступающей из почвы в листву, испаряется, и только 2% растения используют в процессах жизнедеятельности, включая фотосинтез. Изучено строение водопроводящих капилляров и приведены данные об их объеме в древесине. Две проблемы подвергаются постоянному обсуждению. Первая — очень высокие градиенты давлений, необходимые для оправдания экспериментально наблюдаемых скоростей течения почвенной воды по капиллярам (трахеидам) ксилемы. Вторая — большая высота подъема воды (известны деревья высотой 120 м). Обе проблемы могут быть решены на основе известных физических законов гидромеханики без привлечения неопределяемых и экспериментально не измеряемых феноменов, таких как биологический потенциал, жизненная сила и пр.

Механизмы создания градиента давлений в капиллярной системе ксилемы деревьев

Согласно приведенным в ряде публикаций расчетам, давление в корневой системе деревьев, необходимое для движения воды с экспериментально измеренной скоростью, должно бы достигать ~30 МПа [1—6]. Столь высокое внутреннее давление совершенно несовместимо с прочностью древесины и никогда не было подтверждено экспериментально. Даже существенно меньшие корневые давления не были зафиксированы. Корневое давление, будь оно хотя бы заметным, можно было бы обнаружить по выделению воды из пня свежеспеленного дерева, когда корни еще живы. Согласно гипотезе о корневом давлении вода из таких пней должна бы фонтанировать или, по крайней мере, обильно сочиться. Этого не происходит.

В литературе рассмотрены и другие гипотетические механизмы, которые могли бы обеспечить доставку почвенной воды от корней к кроне деревьев. Утверждают, например, что движение воды по капиллярам ксилемы обусловлено явлениями адгезии и когезии, а также осмотическим давлением в живых клетках корней и листьев и даже кавитацией воды. При внимательном анализе эти механизмы [1—7] оказались не-

конструктивными и в научном отношении необоснованными.

Адгезия определяет смачивание капилляров водой, а когезия (межмолекулярные связи) — поверхностную энергию и вязкость воды. Силы адгезии в капиллярах направлены перпендикулярно потоку воды и, следовательно, не могут воздействовать на его скорость. Адгезия и когезия в совокупности составляют основу капиллярных явлений. Обусловленная ими высота подъема воды в капиллярах зависит от степени смачивания поверхности (адгезия) и поверхностной энергии воды (когезия). При полном смачивании высота столбика воды в капилляре диаметра D по формуле Жюрена равна:

$$h = 29,8D^{-1}$$

где диаметр капилляра D — в мкм, а высота столбика воды h — в м. Этим аспектом капиллярных явлений роль адгезии и когезии в водном режиме растений исчерпывается [8—10].

Осмотическое давление в клетках корней, возникающее вследствие пополнения их продуктами фотосинтеза, увеличивает поступление в них почвенной воды. Направление этого потока противоположно потоку воды в стволе дерева. Следовательно, «корневое давление» не способствует движению воды к кроне, но может его затруднять. В нормальных условиях осмотическое давление в клетках корней уравновешено упругостью клеточных мембран и поэтому не может быть измерено макрометодами.

В клетках листьев осмотическое давление возникает вследствие образования в них продуктов фотосинтеза органических соединений и, как и в клетках корней, также практически уравновешено упругостью клеточных оболочек. Осмотическое давление направляет воду внутрь клеток и не оказывает прямого действия на скорость течения основной массы испаряемой растением воды, поступающей по капиллярам ксилемы (~98%). Как и капиллярные силы смачивания, осмотическое давление определяет только равновесное состояние системы, а не кинетику течения почвенной воды по капиллярам ксилемы.

Жизнедеятельность клеток растения протекает нормально, когда они находятся в изотоническом растворе слабо варьируемого или постоянного состава. Поскольку в процессах жизнедеятельности растения используют 2% от всей поступающей в листву почвенной воды, изотоническим для клеток дерева является водный раствор гуминовых ингредиентов (кислот,

солей и пр.), в котором их установившаяся равновесная концентрация примерно в 50 раз выше, чем в почвенной воде. Постоянство состава изотонического раствора поддерживается балансом притока и испарения почвенной воды. Длительный контакт клеток с почвенной водой (гипертоническим раствором) вызывает их разбухание и гибель. Точно также к гибели клеток приводит их взаимодействие с гипотоническим (высококонцентрированным) раствором почвенных ингредиентов.

Под действием осмотического давления синтезированные в листьях органические соединения перекачиваются по клеткам флоэмы в плоды и семена, питают клетки корней и запасаются в различных частях растения. В основном к этому выравниванию концентраций сводится действие осмотического давления на потоки растворов в растениях. Факт выделения растительных соков из стволов деревьев в ряде публикаций используют как аргумент в пользу высоких давлений в ксилеме. Однако растительные соки содержат продукты фотосинтеза (сахара и другие органические соединения), которых нет в почвенной воде. Стекают они по флоэме сверху вниз. Их выделение — следствие того, что корни, плоды и камбий не в состоянии усвоить всю продукцию листьев. Процесс их выделения обусловлен разностью концентраций органических соединений в живых клетках флоэмы и в окружающей среде.

Анализ водного режима растений приводит к однозначному выводу: механизм движения почвенной воды обусловлен исключительно градиентом давления (разрежения), возникающим вследствие испарения воды листьями. Солнечное тепло является поставщиком энергии для всего процесса движения воды в растениях. Другими «двигателями» растения не располагают.

Механизм подъема воды по капиллярам ксилемы

Измеренные по снимкам электронной и оптической микроскопии диаметры водопроводящих капилляров ксилемы лиственных деревьев в среднем составляют $14,5 \pm 0,24$ мкм, а хвойных $11,1 \pm 0,01$ мкм [6], по другим данным 5—7 мкм [5, 7]. Соответственно высота равновесного столбика воды в них по формуле Жюрана составляет приблизительно 2—3 м. Для подъема воды к вершинам деревьев этого явно недостаточно.

Силы поверхностного натяжения и смачивания в прямолинейных капиллярах как угодно малого диаметра, в принципе, не могут поднять воду на высоту более 10 м. При $h > 10$ м расчетное разрежение под мениском превосходит по величине атмосферное давление (разрежение менее вакуума невозможно), и сила тяжести разрывает столбик воды в капилляре. Поэтому, если исходить из гипотезы о прямолинейности водопроводящих капилляров, для подъема воды на высоту, например 120 м, необходимы достаточно высокие давления (до 1,2 МПа). Их невозможно обеспечить испарением воды и объяснить только капиллярными явлениями.

По-видимому, представление о неизменности диаметра канала по всей длине водопроводящих капилляров ксилемы сложилось в результате визуального анализа отдельных и случайных срезов древесины. В более обстоятельных исследованиях представлено секционное строение водопроводящих капилляров (трахеид) ксилемы и флоэмы [11, 12]. Согласно микроснимкам поперечных срезов древесины (рис. 1 и 2) в пере-

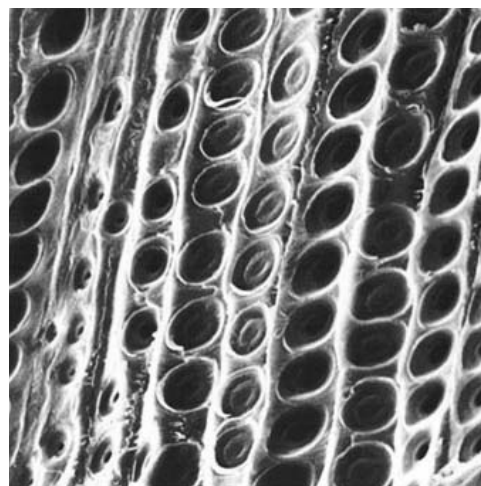


Рис. 1. Срез древесины клена.
Увеличение 2000

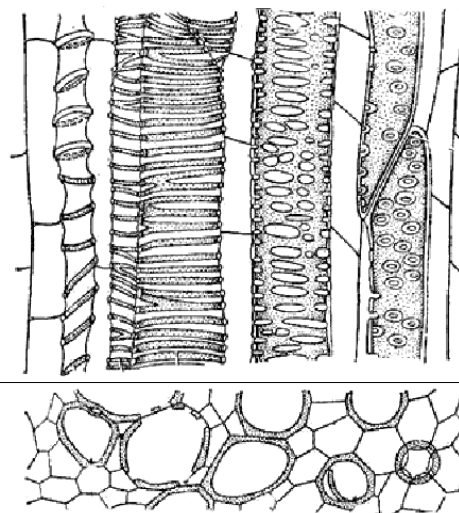


Рис. 2. Модель среза древесины хвойного дерева

родках водопроводящих капилляров имеются аппендиксы со сквозными тонкими каналами. Толщина перегородок, разделяющих секции, и диаметры капиллярных каналов в аппендиксах и перегородках порядка 2—5 мкм, длина аппендиксов 5—7 мкм. Расстояние между торцами секций составляет 250—580 мкм, иногда до нескольких мм (данные для разных деревьев). Гидравлическое сопротивление перегородок с аппендиксами, согласно расчетам, сопоставимо с гидравлическим сопротивлением основного капилляра.

Секционное строение капилляров затрудняет течение в них воды за счет дополнительного гидравлического сопротивления, но обеспечивает участие в подъеме воды на высоту дерева не одного, как для линейного капилляра, а многих менисков, по одному в каждой секции. Обобщенную модель капилляра ксилемы можно представить как каскад секций, соединенных тонкими каналами в аппендиксах (рис. 3а). В другом варианте водопроводящих капилляров секции соединены каналами в перегородках, расположение которых также обеспечивает образование менисков (рис. 3б).

Мениск в секции капилляра диаметром D с входящим в нее аппендиксом, внешний диаметр которого X

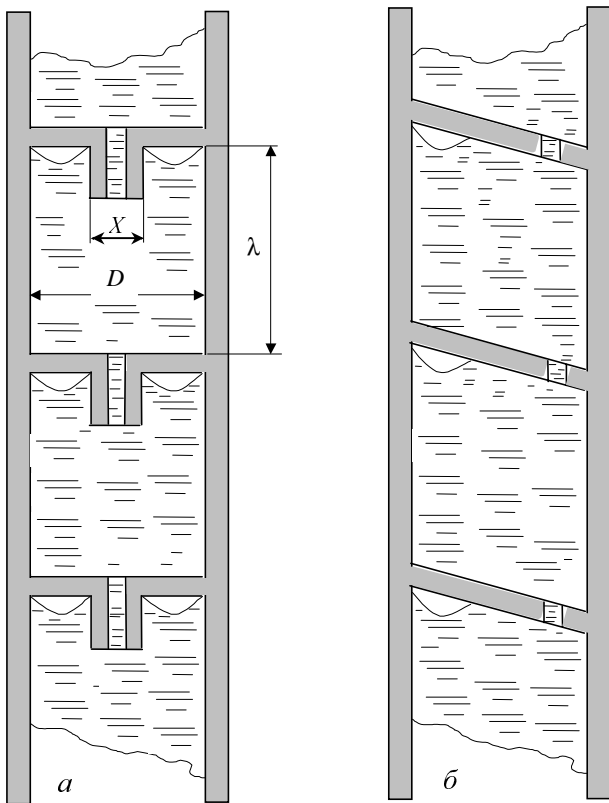


Рис. 3. Модели капилляров ксилемы с перегородками: с аппендиксами (а) и с отверстиями (б)

составляет часть поверхности тора. Капиллярное давление в каждой секции при полном смачивании в принятом приближении равно $4\sigma(D - X)^{-1}$. Это давление уравновешено весом столба воды диаметром D и длиной L . Условие такого равновесия:

$$4\sigma(D - X)^{-1} = Lgq$$

σ и q — поверхностное натяжение и плотность воды, σ (н/м), q (кг/м³), $g = 9,81$ м/с² — ускорение силы тяжести. Следовательно, $L = 4\sigma(D - X)^{-1}(gq)^{-1}$. Для воды в нормальных условиях:

$$L = 29,8(D - X)^{-1}$$

Если перегородок с аппендиксами нет ($X = 0$), выполняется классическая формула Жюрена. При $D - X \approx 0$, как и при очень малом значении D в формуле Жюрена, расчетная высота поднятия столба воды очень велика, однако она не может превосходить 10 м. В капиллярах диаметром $D = 14,5$ мкм; при $X = 0$; $L \approx 2$ м, тогда как длина одной секции не превышает нескольких мм, причем $10 \text{ м} \gg L \gg \lambda$. Однако каскад секций может обеспечить капиллярный подъем воды на любую высоту. Таким простым приемом природа решила проблему подъема воды на высоту дерева. Для этого не понадобилось высокое давление в корневой системе или осмотическое давление в клетках листьев.

Если соблюдено соотношение $10 \text{ м} \gg L \gg \lambda$, механизм подъема воды работает с большим запасом надежности. Растяжение столбиков воды в каждой секции по всей длине капилляра многократно меньше предельно возможного и наличие менисков во всех секциях не обязательно. Мениски могут деградировать в результате растворения в воде находящегося над

ними воздуха. Такие секции остаются резервными. Мениски в них появляются при разрыве столбика воды в капилляре под действием разности сил тяжести и капиллярного давления, по мере увеличения градиента давлений и соответствующей скорости фильтрации воды.

Запас надежности по длине и диаметру секций явно избыточен для водоподъемного механизма. Можно полагать (поскольку «природа не терпит пустоты»), что длина секций с их радиальными перегородками, длина и диаметр капилляров обусловлены выполнением ими других важных для жизни растений функций, например, формированием двойного электрического слоя, прилегающего к поверхности капилляров (эффект Квинке).

Водопроводящие капилляры ксилемы дерева разветвляются и переходят в более узкие и многочисленные капилляры веток и листьев. Торцы наполненных водой капилляров открыты и сообщаются с воздухом. Равновесная кривизна менисков воды на торцах таких открытых капилляров меньше их радиуса, поскольку $L \gg \lambda$ и зависит от соотношения скоростей испарения и притока в них воды. С увеличением скорости испарения кривизна менисков увеличивается, что вызывает увеличение скорости притока воды. В отсутствие испарения притока воды нет и кривизна менисков минимальна — многократно меньше радиуса открытых капилляров. Кривизна мениска тем ближе к значению радиуса капилляра, чем интенсивнее испарение. Таким простым механизмом автоматически регулируется скорость поступления воды в разные части растений. Если интенсивность испарения превышает приток воды, кривизна менисков на торцах капилляров становится равной их радиусу, вода не доходит до листьев и растение высыхает. Кривизна менисков на торцах сообщающихся с воздухом капилляров является вполне достаточным регулятором распределения потоков воды в растениях.

Имеется еще один фактор влияния на доставку воды — эффект Бернулли. Если всасывающая разность давлений в потоке воды превосходит капиллярное давление, вода в боковые ветки не поступает. Возможно, это одна из причин высыхания нижних мелких веток дерева, тогда как жизнедеятельность крупных веток продолжается.

Атмосферное давление принято считать равным 100 кПа. Фактическая его величина зависит от погодных условий и на уровне моря варьирует от 93 до 105 кПа. Если диаметры открытых капилляров равны среднему диаметру капилляров ксилемы (порядка 14,5 мкм для лиственных деревьев), то максимальное разрежение, достигаемое в результате испарения воды, составляет 2 м водяного столба или 20 кПа. В ночное время и в других условиях значительного сокращения интенсивности испарения разность давлений по длине ствола растения почти нулевая.

Капилляры ксилемы связаны между собой, с флоэмой и внешним покровом дерева многочисленными каналами [3, 6, 7, 11]. В ксилеме деревьев кроме водо-проводящих секционированных капилляров имеются широкие сосуды без поперечных перегородок (рис. 1 и 2), предназначенные для движения по ним воздуха. Разность температур и ветер создают в воздуховодах градиент давления (тягу), направляющий воздух от

почвы через корни к вершине дерева. Чрезмерно высокое разрежение в ксилеме вызывало бы приток в нее воздуха и раствора продуктов фотосинтеза, транспортируемых по флоэме к корневой системе и плодам. Этого не происходит и, следовательно, создаваемая в капиллярах разность давлений вероятнее всего существенно меньше 20 кПа. К сожалению, в публикациях [6, 7 и др.] нет сообщений о непосредственно измеренных значениях разрежения в ксилеме дерева. Градиент водовзводных давлений приходится постулировать на основе скудной информации и логических построений. По одному из косвенных методов оценки градиента давлений на дереве с капиллярами диаметром 40 мкм он составляет $\zeta = \Delta P \cdot h^{-1} = 0,8 \text{ кПа} \cdot \text{м}^{-1}$ (ΔP — разность давлений воды в капиллярах от вершины до корней дерева высотой h). При этом линейная скорость течения в них воды составляет $4 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [12].

Эффект сверхтекучести в механизме водного режима растений

Вязкость почвенной воды не отличается от вязкости обычной воды. Если исходить из предположения, что и в капиллярах ксилемы ее вязкость не отличается от ординарной величины, то рассчитанные по формуле Пуазейля градиенты давлений, соответствующие экспериментально наблюдаемым скоростям течения почвенной воды (водного раствора гуминовых ингредиентов), оказываются чрезмерно большими и, как показано выше, в растениях не реализуются. Градиенты давления (разрежения), реально создаваемые в капиллярах растений испарением воды, многократно меньше. Данное противоречие устраняется, если включить в механизм течения воды по капиллярам растений явление сверхтекучести.

Сверхтекучесть водных растворов в капиллярах с активной поверхностью была открыта и исследована сравнительно недавно [13, 14]. Изучали скорость течения водных растворов в пористых мембранах, сформированных прессованием слоя механоактивированных порошков. Поверхностные оболочки частиц порошков были электрически заряжены вследствие их механической деструкции и эмиссии из них электронов — известный феномен «экзоэлектронной эмиссии». Измерены средние значения длины и диаметра капилляров таких мембран. Рассчитанный по формуле Пуазейля (согласно значениям длины и диаметра капилляров, скорости течения при заданном градиенте давлений) коэффициент вязкости водных растворов в капиллярах оказался в несколько раз меньше табличного значения вязкости воды. Измеренная стандартным вискозиметром вязкость тех же растворов вне мембран не отличается от вязкости воды.

Для выяснения механизма столь необычного явления пористые мембраны формировали из тех же, но специально дезактивированных прокаливанием порошков. Размеры частиц, пористость мембран, длина и диаметр капилляров в них были такими же, как и в мембранах из исходных механоактивированных порошков. Эффекта сверхтекучести в мембранах из неактивных порошков не наблюдалось. Из этих и других контрольных опытов следует: неперенное условие проявления эффекта сверхтекучести воды — электрический заряд поверхности капилляров и наличие в

воде растворенных минеральных солей и слабых кислот. Сверхтекучесть воды в капиллярах обусловлена скольжением ионизованного раствора в электрическом поле поверхности капилляров.

Общеизвестно, что в капиллярах органического происхождения на фазовой границе с водной средой образуется диффузный двойной электрический слой, а в почвенной воде растворены гуминовые кислоты и соли. Данная работа изначально была предназначена для выяснения того, насколько эти факторы достаточны для проявления эффекта сверхтекучести почвенной воды в капиллярах ксилемы деревьев. Анализ приведенных во многих публикациях экспериментальных данных дает основания полагать, что сверхтекучесть является непременным элементом механизма их водоснабжения.

Типичны для водного режима растений сведения о красном клене: «Обычное дерево красного клена ежедневно испаряет около 192 ведер воды, листовая крона дерева находится на высоте пятиэтажного дома» [15]. К сожалению, в монографии [15] не содержатся данные ни о высоте пятиэтажного дома, ни о емкости ведра, ни о диаметре ствола клена. Поэтому в расчетах скорости движения воды в капиллярах ксилемы клена приходится пользоваться типичными параметрами. Примем, что крыша пятиэтажного дома расположена на высоте 20 м от земли, емкость ведра 10 л. Диаметр ксилемы клена примерно 0,5 м, и вся ксилема состоит из водопроводящих капилляров (фактически не вся, часть ее объема занимают воздуховоды). Можно принять и другие допустимые значения этих параметров, но суть расчетов и выводов, которые сделаны на их основе, останутся практически неизменными.

В световых сутках, в среднем, 15 часов ($5,4 \cdot 10^4 \text{ с}$), объем испаренной за это время воды $1,92 \text{ м}^3$. Следовательно, объемная скорость течения воды по всей ксилеме ствола дерева в светлое время суток $Q_0 = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; линейная скорость $V_0 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Диаметр капилляров в ксилеме клена, как для всех лиственных деревьев, принят $D = 14,5 \text{ мкм}$, площадь поперечного сечения одного такого капилляра $s = 1,65 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$. Площадь поперечного сечения ксилемы принята равной $0,2 \text{ м}^2$, а суммарная площадь поперечного сечения каналов всех капилляров равна примерно половине площади поперечного сечения ксилемы $S = 0,1 \text{ м}^2$. Согласно этим данным, число капилляров в поперечном сечении ксилемы:

$$n = S \cdot s^{-1} = 0,1(1,65 \cdot 10^{-10})^{-1} = 6 \cdot 10^8$$

Объемная скорость течения воды в единичном капилляре:

$$Q_K = Q_0 n^{-1} = V_K s = 3,6 \cdot 10^{-5} (6 \cdot 10^8)^{-1} = 0,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$$

Линейная скорость почвенной воды в единичном капилляре:

$$V_K = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

По формуле Пуазейля коэффициент вязкости почвенной воды в капиллярах длиной l :

$$\mu_K = \pi \zeta D^4 (128 Q_K)^{-1} = \zeta D^2 (32 V_K)^{-1}$$

Если сверхтекучести нет, коэффициент вязкости почвенной воды равен табличному значению коэффициента вязкости воды ($\mu_K = \mu_B$) и для обеспечения скорости течения воды V_K в прямолинейных капиллярах диаметром 14,5 мкм необходим градиент давлений ζ_T :

$$\zeta_T = \mu_B (\pi D^4)^{-1} (128 Q_K) = 32 \mu_B V_K D^{-2}$$

Вычисленная в этом случае разность давлений от почвы до высоты $h = 20$ м, необходимая для обеспечения наблюдаемой скорости течения почвенной воды по таким капиллярам, равна $\Delta P_T(20) \approx 1,1$ МПа — давление, явно чрезмерное для прочности дерева, которое невозможно создать испарением воды.

Фактически, как показано выше, капилляры ксилемы составлены из секций, соединенных узкими каналами. Этот фактор не учтен в приведенном расчете минимального градиента давления, необходимого для движения воды с наблюдаемой скоростью. Если гидравлическое сопротивление каналов в аппендиксах такое же, как основного капилляра, то необходимая для течения воды разность давлений составляет не менее 2 МПа.

Величину эффекта сверхтекучести можно определить как отношение коэффициентов табличной вязкости воды к расчетной вязкости почвенного раствора в капиллярах ксилемы или как отношение расчетного (по табличному значению вязкости воды) градиента давлений к реально создаваемому градиенту за счет испарения воды:

$$\beta = \mu_B \mu_K^{-1} = \Delta P_T (\Delta P)^{-1} = \zeta_T \zeta^{-1}$$

Вязкость воды, вычисленная по приведенным данным скорости ее течения в капилляре ксилемы длиной $h = 20$ м при максимально возможном разрежении, равном полному вакууму в вершине дерева $\Delta P = 100$ кПа, $\mu_K = 1 \cdot 10^{-4}$ Па·с (без учета секционного его строения). Это значение в 10 раз меньше табличной вязкости воды при 20–30 °С ($\beta = \mu_B \mu_K^{-1} = 10$). Если же принять близкое к реальному значение $\Delta P = 20$ кПа, то в этом допущении градиент давления по высоте дерева 20 м $\zeta = 1$ кПа·м⁻¹, $\mu_K = 0,2 \cdot 10^{-4}$ Па·с и $\beta = \mu_B \mu_K^{-1} = 50$, а с учетом секционного строения капилляров $\beta \approx 100$. Для приведенных выше значений градиента давлений $\zeta = 0,8$ кПа·м⁻¹, диаметра капилляров 40 мкм и линейной скорости течения $4 \cdot 10^{-3}$ м·с⁻¹ [12] коэффициент сверхтекучести $\beta \approx 100$. Для сравнения: величины коэффициента сверхтекучести воды, полученные в опытах с активированными минеральными порошками и разбавленным водным раствором кремниевой кислоты $\beta \approx 3-10$ [13, 14].

Уместно отметить, что скорости течения почвенной воды по капиллярам ксилемы красного клена ($Q_0 = 3,6 \cdot 10^{-6}$ м³·с⁻¹; $V_0 = 1,1 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹) близки к скоростям, измеренным в других растениях. Опубликованы сведения о линейной скорости движения воды в лиственных деревьях [4, 5]: $1,1 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹ и более, в хвойных деревьях — от $1,2$ до $125 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹.

По литературным данным за вегетативный период одно растение кукурузы испаряет 200 л воды, яблоня — до 26 м³. Если считать вегетативный период яблоня и кукурузы равным 100 суток и световой день равным 15 ч, среднюю суммарную площадь сечения капилляров ксилемы кукурузы равным 3 см², а яблоня — 400 см², то линейная скорость движения воды по стеблю кукурузы и яблоня составляет одну и ту же величину — $1,2 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹. Опубликованы данные о более высоких линейных и объемных скоростях движения воды в стволах деревьев: $V_0 = 39 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹ и $22 \cdot 10^{-4}$ м·с⁻¹, $Q_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м³·с⁻¹ при диаметре ствола меньше 25 см, что эквивалентно линейной скорости $V_0 = 10^{-3}$ м·с⁻¹ [11, 12]. Коэффициенты

сверхтекучести, вычисленные по этим значениям скоростей течения воды близки к приведенным выше.

Хвойные деревья потребляют и испаряют воды значительно меньше лиственных, соответственно в них меньше создаваемый испарением градиент давлений. Диаметр водопроводящих капилляров у хвойных деревьев меньше, чем у лиственных, а скорость течения больше. Соотношение полезно используемой и испаряемой воды, как и эффект сверхтекучести почвенной воды в хвойных деревьях, примерно такие же, как в лиственных деревьях или больше.

Значительные расхождения, в основном, в пределах одного порядка, скоростей течения воды в деревьях разных пород вероятнее всего частично обусловлены различием условий, в которых измерения были проведены, и их интерпретацией. Редки публикации, в которых данные о скорости течения воды приведены в сочетании с данными о диаметре водопроводящих капилляров, высоте растений, диаметре их ксилемы. Однако во всех публикациях указано на парадоксально большие скорости течения воды в капиллярах растений.

В создании и в жизнеобеспечении растительных форм жизни природа весьма рациональна. У нее было достаточно времени для их совершенствования в процессе эволюции. Явление сверхтекучести экономит затраты энергии на транспорт воды из почвы к листьям.

Из изложенного следует, что эффект сверхтекучести почвенной воды в растениях позволяет трактовать механизм их водного режима. Вывод о сверхтекучести почвенной воды в капиллярах растений можно было бы сделать на основе непредвзятого анализа экспериментальных исследований их водного режима. Однако мысль о возможности значительного уменьшения вязкости почвенной воды в капиллярах растений представлялась вполне одиозной. Открытие нами эффекта сверхтекучести воды в капиллярах пористых тел [13, 14] послужило стимулом искать ему приложение в других объектах. Растения оказались одним из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ст. «Водоснабжение деревьев». В кн.: Биологический энциклопедический словарь. Гл. ред. М.С. Гиляров. Изд. 2-е, исправл. М.: Сов. Энциклопедия, 1986, 864 с.
2. Крамер П. Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Мир, 2003, 231 с.
3. Zwieniecki M.A., Holbrook N.M. Plant Physiol., 2000, v.123, p. 1015.
4. Zimmer C. J. Natural History, 2000, October, p. 36.
5. Saupé S.G. Plant Physiol., 2006, v. 327, p. 36.
6. Gorsuch D.M., Oberbauer S.F., Fisher J.B. Am. J. Bot., 2001, № 88, p. 1643.
7. Zwieniecki M.A., Melcher P.J., Holbrook N.M. J. Exp. Bot., 2001, v. 52, № 355, p. 257.
8. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1987, 400 с.
9. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1976, 512 с.
10. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. Л.: Химия, 1984, 388 с.
11. Holbrook N.M., Burns M.J., Field C.B. Science, 1995, v. 270, p. 1193.
12. Pockman W.T., Sperry J.S., O'Leary J.W. Nature, 1995, v.378, p. 715.
13. Редькина Н.И., Ходаков Г.С. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2002, т. 44, № 3, с. 39.
14. Редькина Н.И., Ходаков Г.С. Теор. основы хим. технологии, 2001, т. 35, № 4, с. 360.
15. От молекул до человека. Пер. с англ. М.: Просвещение, 1977, 361 с.