

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*161.1 + 551.482.215

**ВОДНЫЙ РЕЖИМ НАГОРНЫХ ДУБРОВ
ЮЖНО-РУССКОЙ ЛЕСОСТЕПИ**

© 2012 г. М. Г. Романовский, А. Г. Молчанов

*Институт лесоведения РАН
143030 Успенское, Одинцовский р-н, Московская обл.
E-mail: root@ilan.ras.ru*

Поступила в редакцию 20.08.2011 г.

Нагорные дубравы на темно-серых лесных суглинках в южной лесостепи, имея автоморфный режим водного питания, переживают засухи второй половины вегетации за счет создания и использования биогеоценозами запасов влаги в почве и грунтовых водах (ГВ), доступных глубоким ярусам корневых систем древесных пород. Два маломощных песчаных горизонта, переслаивающих днепровские моренные суглинки, на высотах 120 и 143 м над ур. моря служат коллекторами и транспортерами ГВ на 10–15 м ниже уровня водораздельных плато и террас. К осени деревья иссушают подпочвенные горизонты до капиллярной каймы ГВ. К весне влажность иссушенных горизонтов восстанавливается. Запасы ГВ позволяют нагорным дубравам сохранять относительно высокие значения предрассветного водного потенциала листвы $\Psi_{\text{рд}} \geq -0.8$ МПа, не взирая на падение водного потенциала почвы до $\Psi_s \approx -2.4$ МПа.

Лесостепь, нагорные дубравы, запасы влаги, засуха, водопотребление, уровень грунтовых вод, водный потенциал суглинков и листьев дуба.

Динамика поступления воды в корнеобитаемый слой почвы с атмосферными осадками и горизонтальным притоком почвенно-грунтовых вод, запасы почвенной влаги и их распределение по профилю почвы в широколиственных лесах и лесостепи определяют эколого-географическое распространение растений. Зональные лесные экотопы европейской лесостепи, занимающие высшие точки водоразделов, приподняты над руслами рек на 50–60 м, автоморфны, изолированы от подпитки грунтовыми водами (ГВ) и существуют только за счет атмосферного водного питания. Неустойчивое, и в отдельные годы и сезоны недостаточное увлажнение нагорных лесов на темно-серых суглинках обуславливает в южной лесостепи особую сложность отношений “дерево – почвенная влага”. Атмосферных осадков, приходящих за вегетацию, не хватает для обеспечения транспирационных затрат нагорного широколиственного леса [38, 39]. Для транспирации нагорной дубравы I–II класса бонитета необходимо 400 мм воды, а в течение V–IX месяцев вегетации в южной лесостепи выпадает от 200 до 300 мм, а за отдельные годы – 110–460 мм осадков [36]. Поэтому массивы нагорных широколиственных лесов устойчи-

вы лишь в тех биогеоценозах, где есть возможность накопления буферных запасов влаги [18] за счет осадков холодного периода.

Работа представляет попытку обобщения стационарных мониторинговых наблюдений за водным режимом нагорных дубрав, находящихся на пределе и за пределами возможностей водообеспечения за счет атмосферных осадков, поступающих за сезон вегетации.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Обобщены и систематизированы результаты длительных мониторинговых наблюдений за водным режимом дубрав, проведенных на биогеоценологических стационарах в аридной и семиаридной зонах [35]. Это, прежде всего, стационары в южной лесостепи Воронежской области: Теллермановский стационар ИЛАН [10, 21, 22, 28, 38], стационар ВНИИЛМ “Шипов лес” [3, 30], Каменностепский стационар Института почвоведения им. В.В. Докучаева [2], Нижнедевицкая водно-баллансовая станция [15]; а также Центрально-Черноземный государственный биосферный заповедник им. В.В. Алехина [1] в Курской области.

Стационарные наблюдения за водообеспеченностью и водопотреблением нагорных дубрав лесостепной зоны дополнены наблюдениями за искусственными лесонасаждениями в условиях сухой степи и полупустыни [6, 7, 25, 35].

В 1990–2010 гг. в нагорных дубравах Теллермановского стационара ИЛАН проведены дополнительные, сравнительно кратковременные (от 1 до 10 лет) наблюдения за влажностью суглинков до глубины 6 м [13, 14, 17, 38], током пасоки [12], водным потенциалом почвы и листьев дуба [13, 14, 17, 22, 23].

Методы исследования водного режима нагорных дубрав подробно описаны в публикациях [10, 35, 38], и мы остановимся только на определении параметров, использованных в работах последних десятилетий. Водные потенциалы листьев и почвы при одновременном измерении устанавливали криоскопическим методом [13, 14, 28], при определении одного лишь водного потенциала листьев пользовались камерой давления [5, 22–24]. Водный потенциал листьев определяли раз в сутки в предрассветное время [22–24] или в предрассветное и полуденное время [13, 14, 22]; лишь в отдельных случаях измерения повторяли в течение суток через час [13, 14]. Суточная динамика скорости тока пасоки установлена с помощью полевого переносного прибора для определения водопотребления древесными растениями тепловым импульсным методом [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влагозарядка и влагозапас темно-серых лесных почв и подпочвенных горизонтов. Весеннюю влагозарядку лесной почвы обеспечивают осенне-зимние и ранневесенние осадки. При снеготаянии почвенно-грунтовые воды стекают в балки, образуя в них мощные ручьи. Пиковые расходы воды в апреле в тальвегах балок достигают 200 л с^{-1} . В Теллермановском опытном лесничестве ИЛАН пиковый сток по короткой, длиной 3.7 км, балке колеблется по годам от 5 до 50 л с^{-1} [20]. Интенсивный сток длится обычно 1–3 дня. В целом же сброс талых вод растянут до середины, а иногда и до третьей декады июня.

Темно-серые лесные почвы нагорных лесов южной лесостепи поглощают ~94% снегового влагозапаса. Суммарный сток с водосборов лесных балок и оврагов $F \approx 0.06 \cdot (P - 60)$; где F (мм) – сток, P (мм) – запас воды в снеге плюс ее приход с осадками при неустойчивом снежном покрове и во время снеготаяния; $r = 0.75$. По годам величина P варьирует от 90 до 250 мм. В среднем за 1955–1965 гг. P составило 160 мм [20, 38]. Око-

ло 60 мм влаги ежегодно и полностью поглощает почва. Из влагозапаса P сверх 60 мм только 6% расходуется на сток, мигрирует в балки и, в конечном итоге, в пойму.

Скважность почвы на глубине 5–15 см составляет 65–75% ее объема. При малых уклонах рельефа талые воды медленно перемещаются к склонам балок и их отвершков в толще снега, лесной подстилки и высокопорозного поверхностного слоя почвы. Видимые потоки воды на поверхности нагорного плато во время снеготаяния не являются.

В постоянных водотоках с грунтовым питанием весенний подъем ГВ начинается задолго до половодья. В скважинах, пробуренных в верхней пойме, вода с начала марта до конца апреля равномерно поднимается в среднем на 63 см в месяц (более чем по 2 см в сутки). Позже “половодье” начинается в тех логах и балках, где явного грунтового питания не отмечено. Волна подъема почвенно-грунтовых вод распространяется из поймы вверх по склонам на водораздел. На водоразделах начало подъема ГВ задерживается на 1–2 декады. Пик “половодья” в нагорных скважинах глубиной не менее 11 м запаздывает на 1–3 месяца [15, 38]. В нагорных скважинах Теллермановского опытного лесничества ИЛАН подъем ГВ (~6 см мес⁻¹) происходит с середины апреля по середину июля [33]. Однако пополняют ГВ при этом осадки не текущего, а позапрошлого года.

В суглинках нагорных плато и террас осадки стекают к водоносному горизонту крайне медленно. Наблюдения М.К. Сапанова [35] в полупустыне Прикаспия показали, что линзы пресной воды под понижениями (падинами), возникающие в годы обильного весеннего промачивания, оседают в тяжелых суглинках до уровня ГВ окружающего ландшафта 2–3 года. Коэффициент фильтрации воды в тяжелых суглинках – $0.1 \div 0.01 \text{ м сут}^{-1}$ (в глинах – 0.001 м сут^{-1}) [15]. В Теллермановском опытном лесничестве на солонцевой поляне на окраине нагорного плато коэффициент фильтрации по оценке В.В. Осипова составляет менее 0.001 м сут^{-1} . В основной толще суглинков, слагающих нагорный массив, скорость фильтрации около 0.01 м сут^{-1} [28].

При такой скорости вертикального стока осадки затрачивают на перемещение к ГВ через 8–9 м суглинков около 800–900 суток. Влага, поступившая с атмосферными осадками, достигает капиллярной каймы ГВ, поднятой над уровнем ГВ на 2.5–3.0 м, приблизительно за 2.5 года.

Горизонтальное перемещение почвенно-грунтовых вод в суглинках нагорных плато и крупных

террас практически отсутствует, но на глубине 10–16 м, в зависимости от положения в рельефе, тяжелые суглинки Теллермановского леса подстилаются прослойками песка [34, 38]. Водоносный горизонт мощностью около 0.5 м (вероятно, не сплошной) простирается на отметках 140–145 м над ур. моря, и обеспечивает медленный горизонтальный транспорт воды к местам разгрузки ГВ, пополнение запасов капиллярной каймы ГВ и выравнивание “зеркала” ГВ. Из водоносного горизонта часть воды сбрасывается боковым оттоком в балки, часть фильтруется ниже, в более глубокие слои. Места разгрузок ГВ, существовавших ранее и современных, маркированы на северных склонах истоками ручьев и известковыми туфами [31, 32, 38]. Ниже, на глубине около 120 м над ур. моря, залегает еще один маломощный водоносный горизонт. Он участвует в водном питании дубрав на террасах юго-западной и северо-восточной частей Теллермановского лесного массива.

Судя по публикациям П.В. Отоцкого и А.А. Дубянского, слабые водоносные горизонты [11, 29, 30] играют заметную роль в водном балансе лесных биогеоценозов южной лесостепи. Маломощные песчаные прослойки в толще моренных суглинков – общее явление геологического строения днепровских отложений Среднерусской равнины, связанное, вероятно, с пульсациями климата, охватывавшими огромные территории.

Весной к началу вегетации слой 0–1 м темных тяжелосуглинистых почв нагорных плато [20, 21, 38] содержит 360–380 мм воды, в том числе ~165 мм легко доступной для растительности. Слой 0–2 м почвенного профиля содержит 680–720 мм воды, из них ~325 мм – доступная, продуктивная влага. В слое суглинков 0–4 м весной в среднем содержится 1335 мм воды (по годам от 1100 до 1520 мм). К осени от этого влагозапаса остается от 870 до 1140 мм [21]. Если судить по разности между максимальным (весенним) и минимальным (осенним) запасами воды, установленными в течение серии лет, диапазон продуктивной влаги в толще 0–4 м доходит до 500–650 мм, что соответствует годовой норме осадков (530 мм). Фактическое изменение запаса воды за одну вегетацию в толще 0–4 м не превышает 400 мм. С учетом выпадающих осадков общий расход влаги (транспирация растений, физическое испарение воды с поверхностей, сток и инфильтрация воды) биогеоценозами нагорного плато составляет в среднем 410–480 мм год⁻¹, а по годам колеблется от 380 до 570 мм год⁻¹ [21, 38]. Средние транспирационные затраты нагорных насаждений (400–405 мм год⁻¹) в годы нормального атмосфер-

ного увлажнения полностью обеспечены влагозапасом, хранящимся в толще 0–4 м [38].

Запас почвенной влаги в поверхностных горизонтах суглинков нагорного плато чрезвычайно стабилен. Слой 0–4 м выступает как мощный магазин влаги с емкостью ~450 мм продуктивной влаги. Лишь в редкие годы отсутствия осадков, в период предшествующий вегетации (сентябрь–март) эта емкость не заполняется до конца. В годы малых осенне-зимних осадков (менее 200 мм за IX–III месяцы) влагозапас в толще 0–4 м нагорных суглинков заметно сокращается (рис. 1).

Удивительное постоянство запаса влаги в поверхностной толще 0–3 м суглинков отметила также Г.С. Базыкина при анализе многолетней динамики водного баланса типичных черноземов заповедной степи в Центрально-Черноземном биосферном заповеднике [1].

Годовые суммы осадков и их сезонное распределение сильно варьируют по годам ($C.V. \approx 30\%$ [4]) и многолетним периодам. Можно выделить пятилетки, настолько различающиеся между собой, что лес, стоя на месте, попадает то в климатические условия Волгоградской, то Московской области [10]. Лесной биогеоценоз выравнивает нестабильный режим увлажнения, сохраняя к началу вегетации во влагоемком горизонте 0–4 м лесной почвы 480 мм влаги, доступной лесной растительности, – запас, близкий к годовой норме осадков (530 мм год⁻¹) [28, 36, 38].

Грунтово-почвенные воды и глубокие ярусы корневых систем. Ниже 4 м от поверхности почвы, от 4–4,5 до 5,5–6 м глубины, следует иссушенная “зона аэрации” (“мертвая зона”), где летом влажность суглинков ниже влажности разрыва капилляров. В 1955–1975 гг. считалось, что корни древесных растений не способны преодолеть мертвую зону, и активное поглощение корнями влаги глубже 4 м невозможно. В связи с этим мониторинг влажности почв и подпочвенных горизонтов, проводившийся в 1945–1955 гг. в широколиственных лесах южной лесостепи и на объектах аридного лесоразведения до глубины 6–10 м [6, 7], был впоследствии ограничен поверхностным слоем 0–4 м [10, 20, 21].

Глубже 4 м в нагорных дубравах просачивается ~8–11% осадков, поступающих за год, что составляет ~40–60 мм [10, 20, 38]. Около 10 мм глубокие ярусы корневых систем деревьев перехватывают на пути нисходящей миграции влаги к ГВ. Инфильтрация ~35–50 мм в год пополняет ГВ. Около 30–40 мм ГВ повторно потребляет древесная растительность и только около 10 мм стекает по водоносному горизонту, в балки и в ко-

нечном итоге попадает в реки [32, 34, 38]. Периоды, когда количество осадков в течение многих лет остается низким, а уровень ГВ опускается настолько, что деревья уже не способны извлечь из них дополнительную влагу, чрезвычайно редки. В Теллермановской роще такое опускание ГВ наблюдалось в 1970–1974 гг. (под наиболее продуктивными нагорными дубравами ГВ опустились на 14–15 м от поверхности почвы, и в отдельных скважинах вообще исчезали, не обнаруживаясь даже в водоносном горизонте); тогда в нагорных лесах массово усыхали переуплотненные приспевающие культуры дуба [38].

Анализ корреляций уровня ГВ с количеством выпадающих осадков, радиальным приростом древесины и продукцией листовой массы позволяет оценить время вертикального перемещения влаги от поступления осадков на поверхность почвы до ГВ. Отмечена корреляция массы листового опада с суммой летних осадков за три предшествующих года ($r = 0.68$) [8]. Уровень ГВ под нагорными дубравами Теллермановского леса в наибольшей мере коррелирует с летними осадками позапрошлого года ($r = 0.6–0.8$) [32, 33]. В Каменной степи Г.Ф. Басов отметил сходство динамики уровня ГВ с суммами осадков трех предшествующих лет [2].

В нагорных экотопах запас ГВ доступен только древесным растениям. Потребляя ГВ и регулируя сток осадков к водоносным горизонтам, лесная растительность на тяжелых почвах непосредственно определяет их уровень. В искусственных насаждениях аридных регионов уровень ГВ зависит от возраста и состояния лесных культур [7, 25, 26, 35]. В Шиповом лесу уровень и динамика ГВ различны под примыкающими к лесу сельскохозяйственными угодьями и под древостоями [3, 29, 30]. Под землями сельскохозяйственного пользования на границе Теллермановской рощи, на высших отметках водораздела рек Хопер и Карачан ГВ лежат на глубине 6–7 м, тогда как под лесом – 9–12 м. Уровень ГВ 6–7 м под безлесными водоразделами Воронежской губернии был неоднократно зафиксирован А.А. Дубянским [11].

В развитии представлений о водном режиме нагорных дубрав особую роль сыграли раскопки шурфа глубиной 12 м, организованные В.В. Мамаевым в нагорной дубраве Теллермановского опытного лесничества ИЛАН, расположенной на 65 м выше межженного уровня р. Хопер. Водный потенциал образцов почво-грунта ψ_s , взятых из шурфа, определяли криоскопическим методом [13, 14, 28, 38]. В 300 м от шурфа на пашне на раскорчеванной вырубке, безлесной с 1936 г., разме-

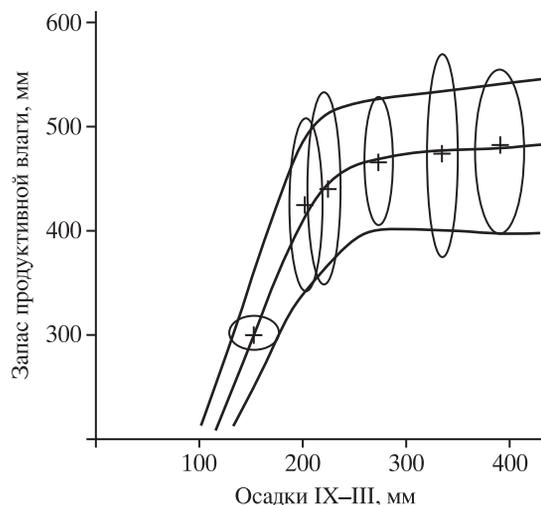


Рис. 1. Запасы продуктивной влаги в толще 0–4 м темно-серых лесных суглинков нагорного плато (запас, мм), зарегистрированные в конце апреля, в зависимости от обилия осадков в предшествующие месяцы (IX–III, мм). Шесть эллипсов рассеяния оценок влагозапаса по 6 годам наблюдения в 7 древостоях возрастом от 25 до 40 лет (по [21]). Верхняя и нижняя сплошные линии ограничивают доверительный интервал $\pm 2.5\sigma$.

щался пункт мониторинга влажности суглинков термовесовым методом до глубины 6–10 м по образцам, извлеченным ручным геологическим буром [32, 38]. В этой же точке в 1950-е годы влажность почвы определял С.В. Зонн. Его измерения [6, 7] лежат в тех же пределах, что и произведенные в 1990–2000 гг.

Раскопки показали, что на лесостепных водоразделах корни поздно распускающегося дуба *Quercus robur* L. var *tardiflora* Czern. опускаются на глубину 9–11 (до 12) м, загружая капиллярную кайму ГВ. Поглощающие корни позднего дуба образуют ниже почвенного горизонта А еще два яруса [17, 32, 38]: первый на 6–8 м перехватывает влагу на пути ее миграции к ГВ, второй на 9–10 м обеспечивает собственно потребление ГВ из капиллярной каймы.

Профиль влажности суглинков является одновременно и причиной, и продуктом вертикального распределения корневых систем древесных растений. Ярусность корневых систем, глубина проникновения корней в толщу суглинков определяют в автоморфных биогеоценозах возможности поглощения корнями почвенной влаги [19]. Поздно распускающийся дуб черешчатый в дубравах европейской лесостепи образует на водораздельных плато к 30–40 годам 2–3-ярусную систему корней, опускающуюся до 9–11 м [38]. На суглинках Прикаспия в падинах с ГВ, доступны-

Таблица. Лимиты влажности (%) почвы нагорного плато Теллермановского опытного лесничества ИЛАН под пашней (залежью) и в лесу в 30 м от опушки 1999–2003 гг.

| Глубина, см | Август-сентябрь | | Апрель (III декада)* | | |
|---------------|-----------------|-------|----------------------|-------|-------|
| | пашня | лес | пашня | лес | степь |
| 10 (0–25) | 16–31 | 20–30 | 22–35 | 40–59 | 32 |
| 50 (25–75) | 19–29 | 20–33 | 19–31 | 30–32 | 31 |
| 100 (75–125) | 20–27 | 21–24 | 28–30 | 28–31 | 28 |
| 150 (125–175) | 21–25 | 15–20 | 26–32 | 22–30 | 22 |
| 200 (175–225) | 22–24 | 16–20 | 25–31 | 25–27 | 26 |
| 250 (225–275) | 22–24 | 16–21 | 25–26 | 26–26 | 26 |
| 300 (275–325) | 20–23 | 15–20 | 25–26 | 27–29 | 27 |
| 350 (325–375) | 20–22 | 16–18 | 24–26 | 24–26 | 24 |
| 400 (375–425) | 21–23 | 17–18 | 23–25 | 25–25 | 25 |
| 450 (425–475) | 22–24 | 17–18 | 23–25 | 22–27 | 26 |
| 500 (475–525) | 21–24 | 16–18 | 23–26 | 22–26 | 27 |
| 550 (525–575) | 20–25 | 16–17 | 23–26 | 24–27 | 27 |
| 600 (575–625) | 20–22 | 16–17 | 22–24 | 23–24 | 23 |

* В апреле измерения выполнены в лесу в 1999–2000 гг., под пашней на раскорчеванной вырубке в 1999–2001 гг., под степными травостоями (степь) в 250 м от верхней границы леса в 1999 г.

Примечание. Измерения влажности округлены до 1%.

ми на глубине ~6 м, вяз мелколистный и дуб черешчатый развивают двухъярусную корневую систему [25, 35]. Тонкие корни в глубоких ярусах корневых систем деревьев дуба высших классов роста во влагодефицитных регионах составляют >10% от общей массы корней диаметром 1 мм и менее [32]. Глубокие ярусы корневых систем играют значительную роль в водном режиме и углеродном балансе биогеоценозов, регулярно испытывающих нехватку влаги во второй половине вегетации [17, 32, 38, 40].

В гумидных регионах поступлений воды в горизонт, занятый верхним ярусом корневых систем, хватает для водообеспечения деревьев в течение всего сезона вегетации. На юге европейской лесостепи и южнее в зоне аридного лесоразведения доступная влага в слое почвы 0–4 м обычно ко второй половине сезона вегетации исчерпывается, и деревья вынуждены добывать воду глубже. К концу вегетации глубокие горизонты почвогрунтов под лесом 30–40 лет и старше становятся значительно суше, чем под открытыми лесными и нелесными территориями под травостоями (таблица).

В таблице приведены сравнительные данные 4-летних наблюдений за влажностью 6-метрового слоя суглинков в конце вегетации в сомкнутой дубраве 60-летнего возраста, созданной по сплошной вырубке (“лес”), и на участке этой же вырубки, поддерживаемом в безлесном состоянии в виде пашни или пара попеременно (“ого-

род”) [17]. Начиная с глубины 1.5 м и ниже (до капиллярной каймы ГВ) влажность почвы в лесу к осени во все годы наблюдения на 4–8% меньше, чем под пашней (15–21 против 21–25%). В то же время, верхние горизонты почвы 0–50 см в период окончания вегетации и пожелтения листвы под лесом чаще всего бывают более увлажнены.

Весной, к началу вегетации влажность в лесу и под безлесными пространствами выравнивается (таблица, апрель). Для сравнения приведен результат разового апрельского определения влажности почвы, под степью у верхней водораздельной границы Теллермановского лесного массива (апрель, степь). Весенние влажностные профили 0–6 м во всех трех случаях (огород, лес, степь) чрезвычайно близки.

Динамика водного потенциала почвы и листьев дуба. В ночное время, когда верхний концевой двигатель выключен, нагнетание влаги из почвы осуществляет только нижний концевой двигатель – поглощающие корни. Они медленно закачивают воду в ксилему проводящих корней, ствола, ветвей, листьев, восстанавливая их водный потенциал. В начале вегетации при относительно высокой влажности почвы восстановление водного потенциала листьев ψ_L завершается еще с вечера. Предраусветный водный потенциал листьев ψ_{PD} сохраняется в “нормальных” пределах $-0.5 \div -0.8$ МПа. Во второй половине лета на фоне развития засухи ψ_{PD} в нагорных дубравах восстанавливается до нормы только к рассвету.

В конце вегетации, в августе дерево часто даже к рассвету не может восстановить ψ_L , который падает до $\psi_{PD} = -1.2 \div -2.4$ МПа [15, 22, 23].

При пересыхании поверхностных горизонтов почвы 0–2 м до полной невозможности поглощения из них влаги корнями $\psi_S < -2.4$ МПа [24] водный потенциал листьев за счет поглощения “подпочвенных” ГВ остается утром выше среднего водного потенциала почвы $\psi_{PD} = \psi_S + (0.2 \div 0.6)$ МПа. К транспорту воды от нижних ярусов поглощающих корней в крону подключаются крупные сосуды ксилемы последнего годичного слоя.

Крупные сосуды работают у дуба 1 год, а к следующей вегетации полностью закрываются тиллами (“пузырями” протоплазмы, выросшими в просвет сосуда из контактирующих паренхимных клеток сквозь поры). При малых градиентах ψ скорость перемещения пасоки по длине свободного от тилл крупного сосуда первого года эксплуатации $v(1)$ близка к 0. При $\Delta\psi < 0.1$ МПа m^{-1} крупные сосуды служат скорее магазинами, чем проводниками влаги. Только при нарастании градиентов всасывающего давления $\Delta\psi$ (МПа m^{-1}) у кольцесосудистых древесных пород $v(1)$ резко ускоряется. При $\Delta\psi > 0.1$ МПа m^{-1} открывается ток пасоки по внешнему годовому слою древесины и при дневном пиковом водопотреблении пасока течет на порядок быстрее. Вероятно, при нарастании $\Delta\psi$ крупные сосуды включаются в систему водопроведения поочередно, пропорционально своему диаметру. Наиболее крупные сосуды приступают к проведению воды последними.

В якорных корнях, опускающихся на суглинках до глубины 6–10 м, необходимые градиенты ψ возникают только при почвенной засухе. Возможно, “вентили”, закрывающие крупные сосуды, расположены в сочленениях осей разного порядка: вертикальных якорных корней с горизонтальными, у корневой шейки ствола, в сочленениях ветвей кроны. При переходе этих границ отмечаются скачки ψ [16]. Возможно, все гораздо прозаичнее и крупные сосуды с простыми перфорациями между члениками не работают как водопроводящие трубы из-за гидростатического давления в многометровом столбе воды (бар на 10 м или 0.1 МПа m^{-1}).

Несоответствие скоростей течения пасоки v диаметру сосудов, проводящих ее, впервые было отмечено благодаря исследованиям Н.Г. Жиренко [12, 38]. При равных градиентах давления по длине сосуда и при ламинарном течении пасоки v обязана быть пропорциональной 4-й степени радиуса сосуда (формула Пуазейля [37, с. 180]). Между тем, при низких $v(1)$ в периферическом го-

дичном слое древесины ($n = 1$), где крупные сосуды открыты, скорость движения пасоки та же, что и $v(n)$ в более глубоких ($n = 2 \div 5$) годичных слоях заболони, где крупные сосуды исключены из системы водоснабжения дерева. Средний диаметр сосудов ранней древесины дуба 200 мкм; поздней древесины – 100 мкм. При нарастании градиентов $\Delta\psi \geq 0.1$ МПа m^{-1} крупные сосуды начинают проводить пасоку пропорционально своему диаметру. По периферическому годичному слою стволовой древесины $v(1)$ пасока при пиковых расходах движется в 10–16 раз быстрее, чем по более глубоким слоям $v(n > 1)$ [12].

Интенсивность водозабора древостоем из ГВ ограничена скоростью миграции почвенной влаги к поглощающим корням. В суглинках в зависимости от их механического состава она составляет $\sim 1\text{--}2$ см $сут^{-1}$ [9, 27]. Так, в предпойменной полево-кленовой дубраве Теллермановского леса корневые системы перестойных деревьев *Quercus robur* L. var *tardiflora* Czern. уходят в толщу суглинков до уровня напорных межпластовых ГВ, выклинивающихся в долину реки. В скважине, пробуренной в августе 2003 г. до водоносного песчаного горизонта на глубине чуть более 10 м, через ~ 6 ч уровень ГВ поднялся на 3 м, скважина до глубины 7 м заполнилась пульпой. Трехметровый слой суглинков (7–10 м) был обезвожен корнями деревьев, а скорость фильтрации ГВ не позволяла восстановить влажность иссушенной толщи. Из-за малой скорости фильтрации воды через тяжелые суглинки глубокие ярусы корней не могут взять из капиллярной каймы ГВ более $1 \div 1.5$ мм в сутки, даже при предельном иссушении поверхностных горизонтов почвы [35].

Представление о скорости и объеме водопотребления лесной растительностью южной лесостепи дает динамика опускания ГВ под нагорными дубравами в периоды отсутствия атмосферных осадков. На рис. 2 показаны результаты измерения уровня ГВ в Теллермановском опытном лесничестве ИЛАН в течение 40 дней засухи, с 6 августа 2002 г. до начала сентябрьских дождей. Весь июль стоял жаркий. Осадки с 13 по 22 августа не выпадали. Максимальные температуры воздуха отмечены 2 и 3 августа – 37.0 и 35.2 °С. К началу второй декады августа полегла сныть. В нагорной снытево-осоковой дубраве 21 августа зафиксирован $\Psi_{PD} = -1.9 \div -2.3$ МПа (5 листьев).

При высыхании верхних горизонтов почвы верхний “почвенный” ярус корневой системы дерева превращается в потребителя влаги. Глубокие корни, достающие ГВ, поддерживают не только надземные части древостоя, но и опробковевшие

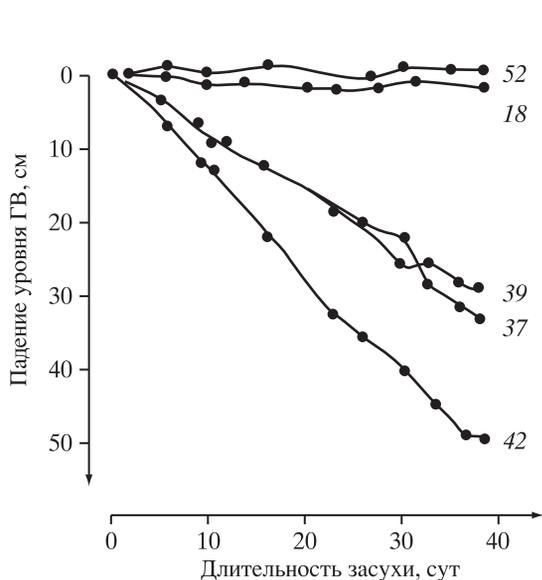


Рис. 2. Падение уровня грунтовых вод (ГВ) в скважинах во время засухи в августе–сентябре 2002 г. под дубравами Теллермановского опытного лесничества ИЛАН на мощных суглинистых отложениях (номер скважины соответствует номеру квартала лесничества): 18 – солонцовая поляна; 39 – конус выноса балки; 37 – нагорная водораздельная дубрава; 42 – нагорная дубрава перед северным склоном балки; 59 – водораздельный ясенник.

поглощающие корни в слое 0–0.5 м [16, 27]. Однако для восстановления работы поверхностных поглощающих корней достаточно даже незначительного увлажнения почвы. После первой прохладной ночи с 22 на 23 августа с минимальной температурой +4 °С и небольшим дождем (12 мм осадков) уже 24 августа в нагорной дубравае был зафиксирован $\Psi_{PD} = -0.7$ МПа. Уровень ГВ продолжал, однако, падать до конца первой декады сентября.

Исходя из удельной водоотдачи 1.1 мм см⁻¹ [25, 35], дубравы в засуху извлекают из глубоких суглинков от 1 до 1.4 мм сут⁻¹. Под площадями, где нет деревьев с глубокими ярусами корневых систем (солонцовая поляна (рис. 2, 18) или водораздельный ясенник 15-летнего возраста, сформировавшийся на месте вырубленной перестойной дубравы и соседствующий с вырубкой, занятая лещиной (рис. 2, 59)), уровень ГВ во время засухи не менялся. В скважинах 37 и 42, пробуренных в нагорных дубравах, уровень ГВ снижается на 0.9÷1.4 см за сутки. Под перестойными 250-летними древостоями, заселенными поздней формой дуба, ГВ опускаются с примерно одинаковой скоростью и на водоразделе (скважина 37), и в верхней пойме (скважина 39) на мощных суглинистых

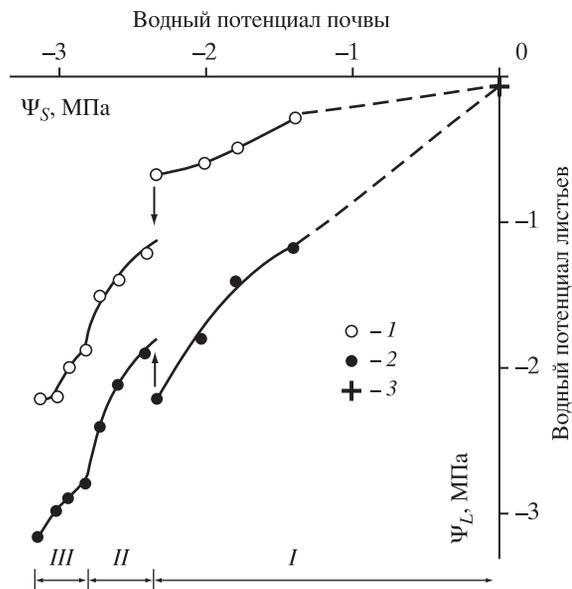


Рис. 3. Зависимость водного потенциала листьев Ψ_L – предрассветного Ψ_{PD} (1) и полуденного Ψ_{MD} (2) в нагорной дубравае (август) от водного потенциала почвы (Ψ_S средний по слою 0–2 м). Насыщение почвы водой до полной влагоёмкости характеризуется параметрами 3 – { $\Psi_S = 0$; $\Psi_L = -0.1$ МПа}. По мере иссушения почвы корневая система дуба проходит состояния I–III: I – работают все ярусы, II – отключен верхний ярус, III – работает только нижний ярус в капиллярной кайме ГВ (по [14]).

отложениях конуса выноса балки. Наибольшая скорость падения ГВ отмечена в сомкнутой культуре дуба 45-летнего возраста перед северным склоном балки (скважина 42), отличающейся максимальным листовым индексом.

По мере развития засухи в нагорной дубравае почва в толще 0–2 м постепенно высыхает до $\Psi_S \approx -2.4$ МПа. После полного исчерпания запасов влаги в слое 0–2 м Ψ_{PD} падает на ~0.4 МПа, с -0.8 до -1.2 МПа (рис. 3, стрелка вниз); одновременно Ψ_{MD} неожиданно возрастает (рис. 3, стрелка вверх) на ~0.4 МПа, с -2.2 МПа до -1.8 МПа. Начинается интенсивное дневное потребление ГВ. Интенсификация работы глубоких ярусов корневой системы деревьев немедленно отражается в изменениях Ψ_L (рис. 3) [5, 13, 14, 38].

При интенсивном водопотреблении древостоев уровень ГВ в суглинках начинает колебаться с периодом 1 сутки и амплитудой 5–20 мм [32, 35]. В условиях глинистой полупустыни Прикаспия (Джаныбекский стационар ИЛАН) суточная пульсация уровня ГВ во второй половине лета отмечается ежегодно [35]. Импульсные колебания уровня ГВ на глубине ~6 м под массивами дуба черешчатого и вяза мелколистного продолжают-

ся до конца вегетации. Общее падение уровня ГВ достигает 2.6 м год^{-1} [25, 26, 35].

М.К. Сапанов выделил два сезонных этапа водного питания древесных растений в аридных условиях [35]: (1) весной, в начале лета (рис 3, I), за счет весеннего влагозапаса, накопленного верхними горизонтами почвы; (2) во второй половине вегетации (рис. 3, II–III), за счет интенсивного дневного потребления ГВ. До исчерпания весенних запасов воды, накопленных в поверхностных горизонтах суглинков, крупные сосуды не работают, потребление ГВ идет в минимальном объеме. После нарастания градиентов ψ до $\Delta\psi > 0.1 \text{ МПа м}^{-1}$ якорные корни начинают усиленный водозабор ГВ, а крупные сосуды ксилемы – интенсивное проведение пасоки [12, 35, 38].

Экстремальные засухи в нагорных дубравах южной лесостепи завершаются отключением не только поверхностного первого яруса корней, но и второго яруса корневых систем на глубине 6–7 м. Водоснабжение деревьев осуществляет только третий ярус поглощающих корней (рис. 3, III), расположенный в капиллярной кайме ГВ.

Особенности водного питания нагорных дубрав южной лесостепи напрямую связаны со спецификой водно-физического режима биогеоценозов, занимаемых автотрофными широколиственными лесами. Островное размещение лесостепных дубрав вызвано мозаичностью ландшафтных разностей, допускающих более интенсивные расходы влаги под лесом [18]. Как правило, нагорные дубравы приурочены к крутым коренным берегам лесостепных рек второго порядка [3, 18, 31, 38 и др.].

Выводы. 1. Нагорные биогеоценозы дубрав южной лесостепи приурочены к разностям рельефа, допускающим накопление и запасаение почвенной влаги, используемой затем в период недостаточного увлажнения. 2. Основной запас – около 450 мм влаги, доступной деревьям, содержат поверхностные горизонты суглинков 0–4 (0–3) м. Влагозарядка поверхностного магазина влаги идет за счет зимних, позднесенних и ранневесенних осадков. 3. Источниками дополнительной влаги ($40\text{--}50 \text{ мм год}^{-1}$) служат: перехват влаги корневыми системами на пути ее миграции, длящейся 2.5–3 года, в грунтовые воды (ГВ) и капиллярная кайма ГВ. 4. Нагорные дубравы к осени иссушают глубокие (2–8 м) горизонты суглинков гораздо сильнее, чем травяная растительность. К началу же вегетации влажность глубоких горизонтов суглинков под лесом и степью выравнивается. Биогеоценоз нагорного широколиственного леса сушит к осени и увлажняет весной “мертвый горизонт” под поч-

вой и над капиллярной каймой ГВ. 5. Усиленное потребление ГВ начинается, если градиент водного потенциала превышает некоторую величину ($\sim 0.1 \text{ МПа м}^{-1}$). После этого “открываются” крупные сосуды в ксилеме ствола и якорных корней и скорость течения пасоки резко возрастает. Представление о величине интенсивного потребления влаги деревьями широколиственного леса во время засухи дает скорость опускания уровня ГВ, составляющая $1\text{--}1.4 \text{ см сут}^{-1}$. 6. В связи с изменением режима поглощения влаги после иссушения поверхностной толщи почвы происходит скачок водного потенциала листьев дуба: предрассветный потенциал падает на -0.4 МПа , полуденный потенциал растет на $+0.4 \text{ МПа}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базыкина Г.С. Анализ многолетней динамики элементов водного баланса типичных черноземов заповедной степи (Курская область) // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1468–1478.
2. Басов Г.Ф. Итоги многолетнего изучения гидрологической роли лесных полос и режима грунтовых вод в Каменной степи // Лесн. х-во. 1958. № 2. С. 79–80.
3. Басов Г.Ф. О некоторых ошибках в работах П.В. Отоцкого // Научные записки Воронежского лесотехнического института. 1960. Т. XXI. С. 112–139.
4. Бирюков В.И., Ланьшин А.С., Степин В.В. Методика и опыт количественной оценки погодных и гидрологических явлений в Хоперском заповеднике за период 1939–1971 гг. // Дубравы Хоперского заповедника. Ч. 1. Условия произрастания насаждений. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1976. С. 31–54.
5. Богатырев Ю.Г. О возможности измерения полного водного потенциала растений камерой давления // Лесоведение. 2002. № 1. С. 52–57.
6. Варлыгин Н.Д., Зонн С.В., Мина В.Н. Водный режим под лесами и полезащитными насаждениями в степи // Труды Института леса. 1953. Т. 12. С. 60–129.
7. Васильева И.Н., Зонн С.В. Физические свойства черноземов Деркульской степи и их изменение под влиянием лесных насаждений // Труды Института леса. 1953. Т. 12. С. 15–59.
8. Ватковский О.С., Быстрянец П.И. Влияние осадков на формирование листвы в снытево-осоковой дубраве // Состояние дубрав лесостепи. М.: Наука, 1989. С. 39–41.
9. Гаель А.Г., Смирнова Л.Ф. Пески и песчаные почвы. М.: ГЕОС, 1999. 252 с.

10. Дубравы лесостепи в биогеоценологическом освещении / Под ред. Молчанова А.А. М.: Наука, 1975. 374 с.
11. *Дубянский А.А.* Новые данные в геологии Воронежской губернии по материалам буровых скважин. Воронеж: Ред.-издательский комитет Наркомзема, 1927. 116 с.
12. *Жиренко Н.Г.* Полевой переносной прибор для определения водопотребления растениями тепловым импульсным методом // Физиология растений. 1995. Т. 42. № 5. С. 805–807.
13. *Иванов В.В.* Сравнительный анализ водного режима пойменной и нагорной дубрав Теллермановского леса: Автореферат дис. ... канд.с-х.наук: 03.00.16. М.: Лаборатория лесоведения АН СССР, 1991. 22 с.
14. *Иванов В.В.* Водный режим пойменной и нагорной дубрав южной лесостепи // Лесоведение. 1991. № 5. С. 33–41.
15. *Каишутин Е.А.* Особенности формирования стока весеннего половодья малых рек лесной и лесостепной зоны Европейской России // Известия АН. Сер. Географ. 2002. № 3. С. 98–106.
16. *Линдеман Г.В.* Взаимоотношения насекомых – ксилофагов и лиственных деревьев в засушливых условиях. М.: Наука, 1993. 207 с.
17. *Мамаев В.В., Романовский М.Г., Судницына Т.Н.* Изменения в почвах пашен среди нагорной лесостепной дубравы // Лесной вестник. 2007. № 5 (54). С. 57–62.
18. *Мигунова Е.С.* В.В. Докучаев и его вклад в лесное почвоведение // Лесоведение. 2011. № 1. С. 73–80.
19. *Модестов А.П.* Правда о корнях. М.; Л.: Гос. изд-во сельхоз. и колхоз.-кооперат. лит-ры, 1932. 80 с.
20. *Молчанов А.А.* Гидрологическая роль леса. М.: АН СССР, 1960. 488 с.
21. *Молчанов А.А.* Воздействие антропогенных факторов на лес. М.: Наука, 1978. 139 с.
22. *Молчанов А.Г.* Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К, 2007. 284 с.
23. *Молчанов А.Г., Молчанова Т.Г.* Предрассветный водный потенциал листьев дуба как показатель влагообеспеченности растений // Лесоведение. 2000. № 2. С. 72–74.
24. *Молчанов А.Г., Молчанова Т.Г., Мамаев В.В.* Физиологические процессы у семян дуба черешчатого при недостатке влаги // Лесоведение. 1996. № 1. С. 54–64.
25. *Оловянная И.Н.* Баланс влаги в черноземовидной почве под насаждением вяза мелколистного // Почвоведение. 1977. № 12. С. 77–87.
26. *Оловянная И.Н., Линдеман Г.В.* О причинах недолговечности культур вяза мелколистного на лугово-каштановых почвах юго-востока европейской России // Лесоведение. 2000. № 6. С. 17–25.
27. *Орлов А.Я., Абатуров Ю.Д., Богатырев Ю.Г.* Экспериментальное изучение влияния недостатка влаги в почвах на жизнедеятельность культур сосны мшисто-лишайниковых сосняков // Почвенно-экологические исследования в сосновых лесах Мещеры. М.: Наука, 1980. С. 86–212.
28. *Осипов В.В., Молчанов А.Г., Жосу В.П., Молчанова Т.Г., Мамаев В.В.* Особенности водного режима и некоторых физиологических процессов дуба // Состояние дубрав лесостепи. М.: Наука, 1989. С. 27–33.
29. *Отоцкий П.В.* Гидрологический очерк Воронцовки (с картой) // Труды Имп. вольного экономического общества, 1894. С. 1–24.
30. *Отоцкий П.В.* Шипов лес. СПб.: Изд-во Евдокимова, 1894. 52 с.
31. *Прохоров Н.И.* Теллермановская роща. Орогеологический и почвенный генезис. Труды опытных лесничеств. 1906. Вып. 4. 71 с.
32. *Романовский М.Г., Мамаев В.В.* Грунтовые воды нагорных дубрав Теллермановского леса // Лесоведение 2002. № 5. С. 4–9.
33. *Романовский М.Г., Мамаев В.В., Сушков С.И.* Динамика уровня грунтовых вод в Теллермановской дубраве // Лесоведение. 2008. № 6. С. 53–58.
34. *Романовский М.Г., Федорова А.И., Морев С.А.* Стратификация грунтовых вод под нагорными дубравами Теллермановского леса // Вестник ВГУ. Сер. “География и экология”. 2005. № 1. С. 62–66.
35. *Сапанов М.К.* Экология лесных насаждений в аридных регионах. М.: Гриф и К, 2003. 248 с.
36. *Уткина И.А., Рубцов В.В.* Современные представления о влиянии изменения климата на лесных филлофагов // Продукционный процесс и структура биогеоценозов: теория и эксперимент. Памяти А.И. Уткина. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. С. 286–312.
37. *Фриш С.Э., Тиморева А.В.* Курс общей физики. Изд. 4-е. М.;Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952. Т. 1. 560 с.
38. Экосистемы Теллермановского леса / Под ред. Осипова В.В. М.: Наука, 2004. 340 с.
39. *Breda N.* Water shortage as a key factor in the case of the oak dieback in the Harth Forest (Alsation plane, France) as demonstrated by dendroecological and ecophysiological study // Recent advances on oak health in Europe / eds.: Oszako T., Delatour C. Warsaw: Forest Res. Inst., 2000. P. 157–159.
40. *Nepstat D.S., Carvalho C.R., Davidson E.A., Jipp P.H., Lefebvre P.A., Negrelros G.H., Silva E.D., Stone Th.A., Trumbore S.E., Vieira S.* The role of deep roots in hydrological and carbone cycles of Amazonian forests and pastures // Nature (Gr. Brit.). 1994. V. 372. N 6507. P. 666–669.

Water Regime of Upland Oak Forests in the Southern Russian Forest-Steppe

M. G. Romanovsky, A. G. Molchanov

In the southern forest-steppe, upland oak forests on the automorphic loamy dark gray soils usually endure droughts in the second half of the vegetative season due to the use of moisture reserves of deep substrate layers and groundwater. Two shallow sandy horizons interlaying moraine loams of the Dnieper glaciation at altitudes of 120 and 143 m a.s.l. serve as collectors and transporters of groundwater, the table of which is by 10–15 m below than the surface of the watershed plateaus and terraces. By autumn, trees desiccate subsoil horizons till the capillary fringe. In early spring, the moisture of dried horizons is restored. The groundwater reserves permit the upland oak forests to preserve the high leaf water potential $\Psi_{PD} \geq -0.8$ MPa despite the potential drops to $\Psi_s \approx -2.4$ MPa in the 0–2-m soil layer.

Forest-steppe, upland oak stands, water reserves, drought, water consumption, level of ground waters, water potential of loamy soils and oak leaves.