

УДК 630*116.11,556.121.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ДОЖДЕВЫХ ОСАДКОВ В КРОНАХ ХВОЙНЫХ ДРЕВОСТОЕВ

© 2020 г. Д. Е. Клименко^а, *, А. Л. Остахова^а

^аПермский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Букирева, 15, Пермь, 614999 Россия

*E-mail: listopad19531@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2018 г.

После доработки 24.05.2018 г.

Принята к публикации 06.04.2020 г.

Максимальный сток дождевых паводков малых рек лесной зоны Урала в значительной степени определяется характеристиками ливневых осадков и степенью их задержания кронами хвойных древостоев. В статье приводятся результаты физического (экспериментального) моделирования процесса водоудержания капель на хвое и метеорологических наблюдений над осадками под кронами хвойных пород. Установлено, что вода удерживается на хвое только в капельном виде; размеры капель, удерживаемые на одной хвоинке, изменяются от 10.6 до 18.6 мг. На основании экспериментов по орошению ветвей установлена единая зависимость максимальной массы удерживаемой влаги от площади листовой поверхности, характеризующаяся коэффициентом корреляции 0.98. Максимальная масса водоудержания на кронах единичных деревьев изменяется от 24.8 до 58.0 кг, или от 1.9 до 4.6 мм в расчете на проекционную площадь кроны. Экспериментальные и расчетные данные подтверждены результатами наблюдений над суммами осадков под кронами хвойных пород. Фактические величины перехвата осадков за время дождя оказываются больше за счет безвозвратных потерь влаги на испарение с листовой поверхности крон. Разработана методика и выполнено моделирование процесса перехвата дождевых осадков за время дождя хвойными древостоями. Для моделируемого водосбора ливневые осадки за первые 5–20 мин дождя почти полностью перехватываются кронами. За последующие 20–90 мин перехватывается около 70% суммы осадков, выпавших за это время. С увлажнением крон величина потерь осадков на перехват плавно снижается: при продолжительности дождей более 5–12 ч (в зависимости от интенсивности) величина перехвата осадков кронами снижается до 28–7%. Дальнейшие потери осадков на кронах стабилизируются на уровне 7%. На основе разработанной модели перехвата дождевых осадков генетическими методами выполнен расчет гидрографа единичного дождевого паводка для модельного водосбора р. Решетка (по модели КДМФОС-76Б). Учет потерь осадков на задержание кронами позволяет снизить предельные погрешности расчетов максимальных паводочных расходов воды со 126 до 25%.

Ключевые слова: лесная гидрология, гидрологические расчеты, дождевые паводки, моделирование, ливневые осадки, перехват осадков кронами.

DOI: 10.31857/S0024114820040063

Формирование максимальных расходов воды дождевых паводков на малых водотоках лесной зоны определяется поступлением ливневых осадков на поверхность водосбора, разного рода потерями, склоновым стокообразованием и его трансформацией в гидрограф стока в замыкающем створе (Голубцов, 2010). К числу наиболее существенных начальных потерь относится перехват дождевых осадков кронами хвойных и лиственных пород, а также потери перехваченных осадков на испарение с листовой поверхности крон. Расчеты предельной (максимальной) величины перехваченных осадков древостоями разного типа и породного состава, определение величин перехвата осадков за время выпадения дождя имеют важное

практическое значение в генетических моделях паводочного стока.

Количественная характеристика ливней, называемая кривой редукции по времени (или “теоретическим профилем ливня”), вошла в теорию и практику гидрологических расчетов в качестве основного метода (Клименко и др., 2018). Кривой потерь ливневых осадков на кронах хвойных пород за время прохождения отдельного дождя часто пренебрегают, что приводит к завышению величин водоподачи под полог леса и ошибкам в расчетах паводочного стока. Между тем величины водоудержания на кронах могут быть весьма существенны.

С целью оценки распределения во времени дождевых осадков, перехваченных кронами хвойных древостоев, выполнен комплекс экспериментальных и лабораторных исследований, метеорологических наблюдений по оценке вододержания влаги на фитомассе лесообразующих пород Среднего Урала. Произведено моделирование процесса перехвата осадков кронами и паводочного стока для экспериментального водосбора. В качестве такового использован водосбор р. Решетка у с. Новоалексеевское (площадь водосбора $F = 32.0 \text{ км}^2$). Водосбор расположен в Свердловской области, в 31 км к западу от метеостанции “Екатеринбург”; оборудован пунктом наблюдений Росгидромета, действующим с 1946 г. по сей день. Основные гидрографические характеристики водосбора: средневзвешенный уклон водосбора 33.1‰; лесистость 82% (в породном составе 72% приходится на сосну; 8% – на березу; 2% – на другие породы (ель, осина, липа и др.); озерность 0%; заболоченность 0%; средняя высота 308 м. В пределах эталонного водосбора проведен комплекс полевых (лесотаксационных и гидрографических) работ. В расчетах использованы данные многолетних гидрометеорологических наблюдений на отмеченном гидрологическом посту, а также метеостанциях “Екатеринбург” и “Ревда”. Разработана методика оценки потерь осадков на кронах древостоев за время прохождения ливней различной интенсивности, выполнена ее апробация.

Важнейшие закономерности перераспределения осадков пологом леса были выявлены к началу XX в. в исследованиях Эбермайера, Гоппе, Н.С. Нестерова, С.Д. Охлябинина и др. (Морозов, 1959). Задержание осадков растительным покровом и последующее их испарение находятся в прямой зависимости от размеров и свойств поверхности смачивания. На сегодняшний день установлено, что перехват жидких атмосферных осадков определяется их количеством, интенсивностью, погодными условиями (температура и влажность воздуха, скорость ветра), характером лесной растительности, задерживающей на своей поверхности определенную часть осадков, а также таксационными характеристиками древостоев (масса крон, хвои, индекс листовой поверхности, бонитет, возраст) (Молчанов, 1960, 1961).

В то же время физические механизмы удержания влаги на хвое изучены слабо. Практически отсутствуют исследования величин потерь осадков во времени (т.е. за отдельные временные интервалы периода дождя).

Максимальные величины вододержания на кронах, по исследованиям разных авторов, существенно различаются. По данным Bele (1975, 1980), еловые древостои могут перехватывать до 3.6 мм слоя осадков единичного ливня. В.В. Рахманов (1981) определил емкость задержания для

хвойных насаждений (ель, пихта) в пределах 2–4 мм (в отдельных случаях – до 6–8 мм). По исследованиям А.И. Субботина (1979), Г.Ф. Морозова и А.Ф. Полякова (Поляков, 1984), О.В. Чубатого (1972) еловые леса задерживают до 10 мм осадков, а сложные елово-пихтово-буковые насаждения – и до 12 мм.

Связь объема вододержания с величиной слоя дождя освещена в работах Л.В. Медведева (1983, 1984), А.А. Лучшева (1940), Г.Ф. Морозова (1959), В. Лархера (1978), А.А. Онучина (2003). А.А. Лучшев пришел к выводу, что при увеличении количества осадков от одного дождя, независимо от его продолжительности, с 0.1 до 50 мм их проникновение сквозь средние части крон ели возрастает с 15–20 до 87%, а коэффициент вариации проникших осадков убывает со 100–300% до 16–20%. При осадках менее 2 мм, почти полностью задерживаемых, и более 10 мм, почти полностью проникающих через крону, зависимость проникновения и коэффициента вариации осадков от их количества близка к прямолинейной. Суммарный перехват связан с возрастом, составом, таксационным запасом насаждений, определяющими площадь листовой поверхности, и количеством атмосферных осадков. Небольшие дожди (0.5–1.5 мм) полностью перехватываются пологом насаждений; максимальная влагоудерживающая способность высокоплотных хвойных древостоев составляет 10–12 мм (Онучин, 2003). А.А. Онучиным предложен метод расчета доли перехваченных осадков, выражающийся зависимостью:

$$P = 35.3 + 6.1 \ln(M) + 0.13(E + П + С + К) \ln(M) - 14.6(X), \quad (1)$$

где X – слой осадков за единичный ливень, мм; P – доля потерь атмосферных осадков, %; M – средний таксационный запас, $\text{м}^3/\text{га}$; $E, П, С, К$ – число единиц ели, пихты, сосны, кедра в составе древостоя, соответственно. Данная зависимость позволяет оценить максимальное вододержание на кронах за единичный дождь, однако дает возможности определить изменение доли перехваченных осадков за время его прохождения.

Ряд исследований посвящен специфическим факторам вододержания, таким как форма и размеры крон (Медведев, 1983), удержание влаги на поверхности ствола и ветвей, стволовой сток (Лохов, 1938) и т.д.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Физические механизмы удержания воды на кронах хвойных древостоев

Удержание жидкости (дождевых осадков или конденсационной влаги) на поверхности хвои и ветвей древесных пород хвойных древостоев осу-

ществляется в капельном виде и обеспечивается за счет поверхностных энергий на границах раздела фаз “твердое тело—газ—жидкость”. При положении капли на поверхности хвои сила тяжести и равнодействующая сил адгезии и когезии действуют однонаправленно, капля воды растекается по поверхности и образует своеобразную “пленку”. Степень смачивания поверхности жидкостью определяется краевым углом смачивания θ . Наличие воскового покрытия (кутикулы) на поверхности хвои приводит к тому, что жидкость образует менискообразные капли, а сама поверхность хвойных является гидрофобной (лиофобной) и характеризуется краевым углом θ от 45° до 90° .

Площадь контакта жидкости с поверхностью определяется величиной поверхностной энергии Гиббса G_s , которая прямо пропорциональна поверхностному натяжению σ (при температуре воздуха 20°C равному 72.25×10^{-3} Н/м) и удельной площади поверхности раздела фаз $S_{\text{уд}}$:

$$G_s = \sigma S_{\text{уд}} \quad (2)$$

При этом площадь поверхности капли (S) может быть выражена как $S = \pi R^2 \times 2 \sin \theta$, а ее объем (V) — как $V = \pi R^3 \times \frac{2}{3} \sin \theta$, где θ — величина краевого угла, π — математическая постоянная, численно равная 3.14. Таким образом, величина удельной поверхности равна:

$$S_{\text{уд}} = SgV^{-1} = 3gR^{-1}, \quad (3)$$

где R — радиус капли воды.

Увеличение краевого угла сверх предельных величин для поверхности кутикулы приводит к движению капли по поверхности хвои в направлении уклона, зависящего как от направления произрастания хвоинки, так и от массы капель на ее поверхности. При перемещении капель воды в нижнюю часть хвои удержание капель обеспечивается за счет взаимодействия сил тяжести ($F_m = \rho \times \frac{2}{3} \pi R^3 g$, где ρ — плотность воды, численно равная 997 кг/м^3 при нормальных условиях; g — ускорение свободного падения, равное 9.8 м с^{-2}) и сил поверхностного натяжения ($F_{\text{п.н.}} = \sigma \times 2\pi R$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения, равный $72.25 \times 10^{-3} \text{ Н м}^{-1}$), а наибольшая масса капли может быть описана как:

$$m = \frac{\rho V}{R^2 g} \quad (4)$$

Таким образом, величина капли, сосредоточенной на каждой хвоинке, имеющей отрицательный уклон, будет пропорциональна радиусу в точке соприкосновения капли с хвоинкой. Поскольку капли концентрируются на изогнутом

вниз конце хвоинки, оценка размеров капли может быть произведена через оценки линейных размеров концевой части хвоинок.

Биометрические показатели и модели роста хвойных древостоев

В связи с тем, что большая часть жидких осадков удерживается на хвое, важнейшим этапом работ в оценке перехвата осадков кронами является определение биометрических показателей хвойных древостоев и отдельных деревьев:

- масса листвы на 1 га (F_1 , т га $^{-1}$);
- площадь листовой поверхности (суммарная площадь односторонней поверхности хвои или листьев) (LA , га);
- число и средние размеры листьев и хвоинок.

Кроме того, учитывается класс бонитета лесов, запас стволовой древесины, степень сомкнутости древостоев.

При оценке средних размеров хвои авторами использован подход, предложенный А.И. Уткиным в соавт. (2008). Его сущность заключалась в формировании репрезентативных выборки хвоинок (с породы определенного возраста и класса бонитета случайным образом отбиралось 100 единичных хвоинок), обмеров хвои автоматизированными средствами (сканирование изображений хвоинок и последующие измерения площади, длины, ширины средствами AutoCAD). На основании выполненных измерений определялись статистические параметры (норма, коэффициент вариации C_v , коэффициент асимметрии C_s) размеров хвои анализируемых пород (табл. 1).

Фитомасса листвы и запас стволовой древесины устанавливаются на основании таблиц хода роста и биологической продуктивности полных древостоев (Швиденко, 2008), результатов полевых лесотаксационных обследований, с использованием экспериментальных данных (Уткин и др., 2008) по площадям поверхности лесных растений, а также космических снимков и крупномасштабных карт. Класс бонитета лесов определен на основании полевых исследований (сведений по высоте и возрасту древостоя) в соответствии с таблицей М.М. Орлова (Швиденко, 2008).

Индекс листовой поверхности (LAI , га га $^{-1}$), удельная площадь листовой поверхности S_{LA} (га т $^{-1}$) определены на основе данных по запасу (Z , т га $^{-1}$) и коэффициенту K_{LAI} , представляющему собой площадь листовой поверхности, приходящейся на единицу таксационного запаса древостоя на участке леса в 1 га (Уткин и др., 1997):

$$LAI = K_{LAI} Z. \quad (5)$$

Определение LAI на основе баз данных и эмпирических зависимостей, выявленных А.И. Ут-

Таблица 1. Статистические параметры размеров хвои отдельных хвойных пород (II класс бонитета, возраст 60–80 лет)

Вид	Статистические параметры					
	площадь хвои, мм ²			длина хвои, мм		
	норма	C _v	C _s	норма	C _v	C _s
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)	77	0.20	1.10	123	0.12	0.69
Сосна сибирская (<i>Pinus sibirica</i>)	101	0.17	0.62	182	0.13	0.23
Ель обыкновенная (<i>Picea abies</i>)	18	0.17	0.07	32	0.10	–0.25
Ель голубая (колючая) (<i>Picea pungens</i>)	23	0.25	0.80	36	0.20	0.83
Пихта сибирская (<i>Abies sibirica</i>)	39	0.26	0.60	51	0.20	0.30

Примечание. C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии

Таблица 2. Значения LAI (га га⁻¹) и его связь с массой листьев F₁ (т га⁻¹) (по: Уткин, 2008)

Вид	Средний LAI, га га ⁻¹	S _{LAI} , га т ⁻¹	K _{LAI} , га м ⁻³	Средняя F ₁ , т га ⁻¹	Уравнения регрессии	R ²
Ель обыкновенная	6.03	2.72	0.138	11.7	LAI = 0.80 + 0.56F ₁	0.61
Пихта сибирская	7.20	3.05	0.081	12.9	LAI = 0.60 + 0.51F ₁	0.72
Сосна обыкновенная	2.41	1.25	0.076	4.81	LAI = 0.14 + 0.47F ₁	0.66
Сосна сибирская	3.20	0.82	0.076	7.30	LAI = 0.91 + 0.31F ₁	0.83
Сосна, все вместе	2.83	1.31	0.076	2.70	LAI = 0.92 + 0.28F ₁	0.59
Лиственница	1.43	0.70	0.053	2.13	LAI = 0.20 + 0.57F ₁	0.83

Примечание. LAI – индекс листовой поверхности, га га⁻¹; S_{LAI} – удельная площадь листовой поверхности, га т⁻¹; K_{LAI} – коэффициент отношения площади листовой поверхности к единице таксационного запаса древостоя на участке леса в 1 га; F₁ – величина фитомассы (масса листьев), т га⁻¹.

киным в соавт. (табл. 2), может быть произведено также на основе величины фитомассы (F₁, т га⁻¹) хвойных пород как LAI = f(F₁).

Общая площадь листовой поверхности (LA, га) определяется как:

$$LA = LAISk, \quad (6)$$

где S – площадь участка леса (га), k – полнота насаждения (в долях от единицы)

Полнота насаждения и его бонитет на модельном водосборе р. Решетки определены на основании полевого обследования, с использованием таблицы М.М. Орлова (Швиденко, 2008). При этом проекционная площадь одного дерева будет выражаться отношением (Sk)n⁻¹, а площадь листовой поверхности одного дерева – отношением (SLAIk)n⁻¹, где n – число деревьев на единицу площади.

Число хвоинок в кроне определялось авторами на основе средней массы выборки хвоинок или средней площади хвоинки в выборке и, соответственно, величин LA или F₁ для модельного участка леса (расчетного водосбора малой реки)

Эксперименты по максимальному водоудержанию кронами хвойных древостоев. Моделирование перехвата осадков хвоей

Эксперименты по определению максимального объема водоудержания кронами хвойных пород проводились в двух видах:

определение аналитическими весовыми методами массы воды, задерживаемой хвоей на опытных ветвях при их искусственном дождевании (опрыскивании водяной пылью), с одновременным определением площади листовой поверхности анализируемых образцов;

параллельные наблюдения над дождевыми осадками под кронами деревьев и на открытой местности.

По результатам наблюдений в естественных и лабораторных условиях установлено, что при постоянном притоке осадков на фитомассу хвойных пород (отдельные хвоинки) капли начинают двигаться к нижней части хвои. Иными словами, капли воды удерживаются только в нижней четверти поперечного сечения хвои (рис. 1). Водоудержание жидких осадков кронами хвойных по-

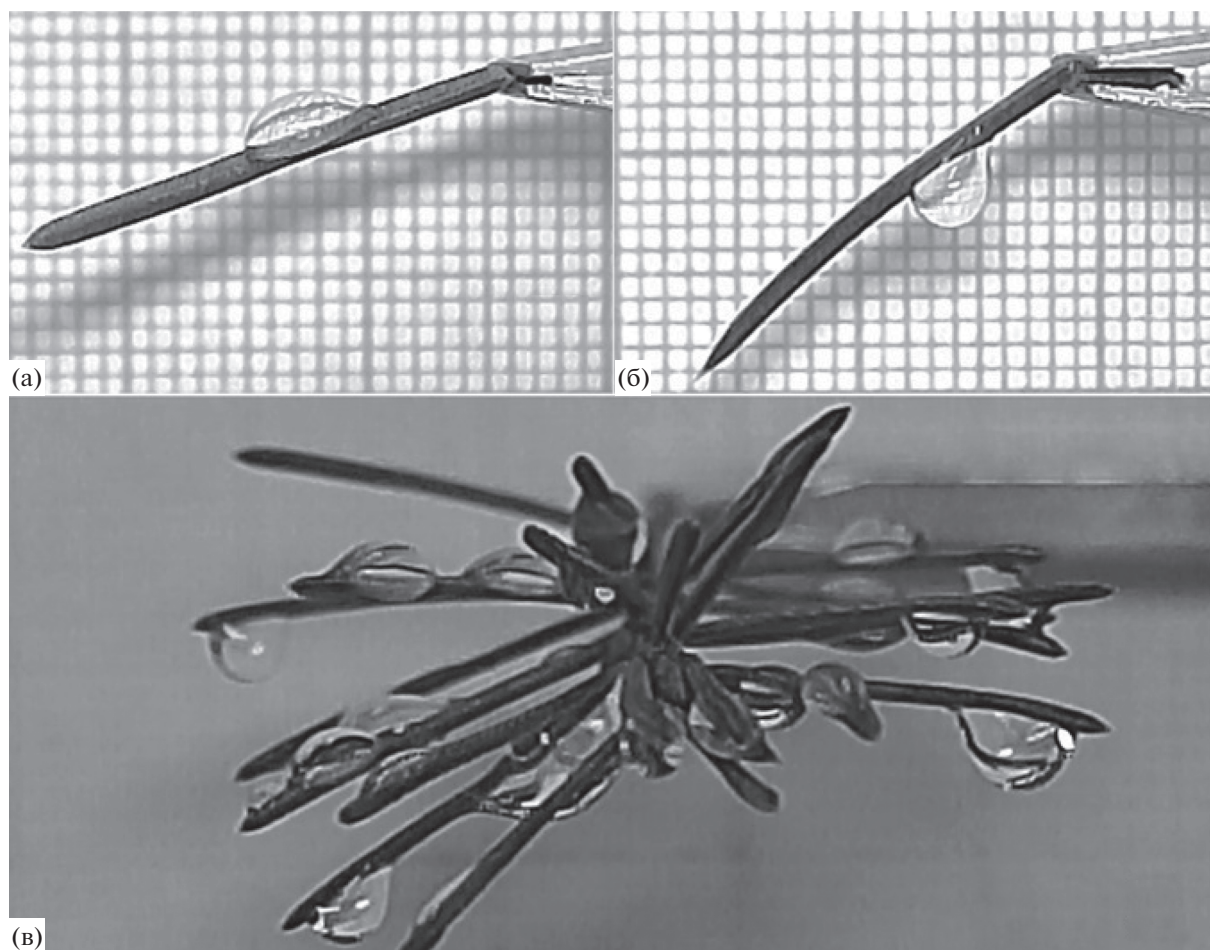


Рис. 1. Удержание капель на хвое в ходе экспериментальных работ (а – положение капли в верхней части хвои; б – положение капли в нижней части хвои; в – максимальное водоудержание капель с участием нескольких хвоинок одновременно).

род происходит только за счет воды, находящейся в капельном виде на хвое, и за счет смачивания ветвей. Экспериментальными данными установлено, что на долю смачивания коры приходится не более 10% общего водоудержания кронами.

В ходе экспериментов по искусственному созданию капель на поверхности хвои (орошению ветвей) при непрерывной масштабной видеосъемке опытов установлены величины краевых углов для хвойных пород (рис. 1). Вне зависимости от породы дерева краевой угол покоящейся капли максимального размера изменяется от 60° до 78° (при среднем значении 70°). При увеличении размера капли начинается ее движение по хвоинке в соответствии с ее уклоном (при этом величина краевого угла увеличивается до 84° – 90°). В ходе движения капля редко остается на верхней части хвои: чаще всего она “сваливается” в нижнюю часть хвоинки, продолжая двигаться по уклону. Величины краевых углов для движущихся висящих капель достигают величин 90° –

115° , а максимальная масса капли, движущейся по хвоинке в “висячем” положении, может достигать 18.6 мг. В момент движения капли по хвоинке собираются также небольшие капли, “висевшие” до этого в состоянии покоя; при достижении капель конца хвоинки происходит ее отрыв и падение. При этом сама хвоинка некоторое время вибрирует, за счет чего в движение приходят капли, располагавшиеся на хвое в состоянии покоя. Экспериментальным путем удалось достичь среднего максимального размера покоящихся на еловой хвое каплей массой 15.6 мг (проанализировано 23 хвоинки). Превышение величины предельных теоретических размеров связано с положением их между хвоинками, что дает еще более высокий водоудерживающий эффект и подробно описано в работе (Zhao Pan et al., 2018). В ходе экспериментов не выявлено зависимости между ориентацией хвоинки к плоскости горизонта (углом наклона) и максимальным размером покоящейся капли. Уклон хвоинки влияет на размеры движущейся капли, но максималь-

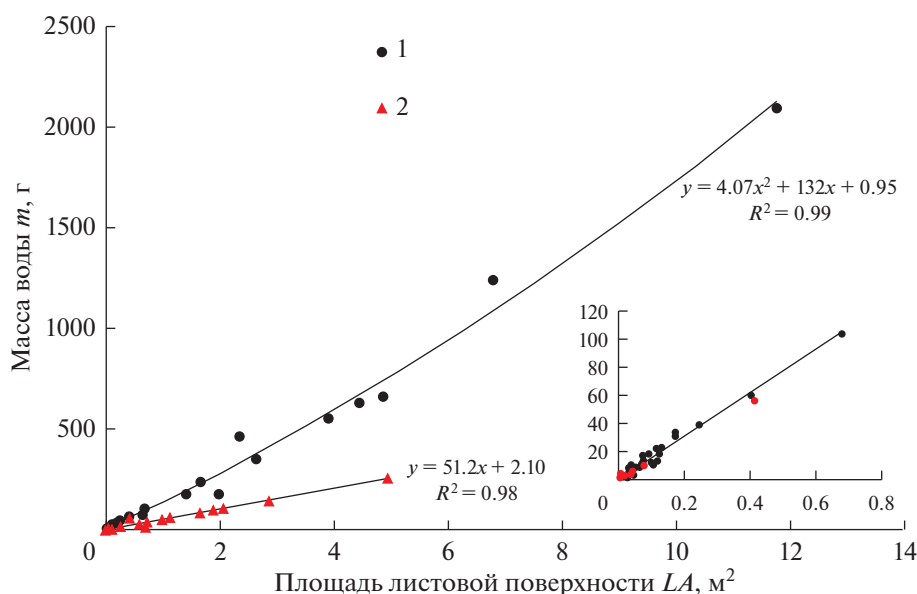


Рис. 2. Эмпирическая зависимость массы удерживаемой на хвое воды (m , г) от площади листовой поверхности хвойных (LA , m^2) (1 – масса удержания воды на хвое, г; 2 – масса удержания воды на ветвях, г).

ный размер капли, покоящейся на хвое сверху или снизу, не зависит от ее уклона. В реальных условиях, за счет воздействия ветра, вибрации ветвей дерева, экспозиции отдельных хвойнок к плоскости горизонта максимальные размеры покоящихся капель, в среднем приходящихся на 1 хвойнку, близки к теоретической величине.

Теоретический размер единичной капли на хвое елей пород I–II классов бонитета возрастом 60–80 лет, определяемый на основе (4), составляет 12.9 мг. В ходе экспериментальных исследований средняя масса капли, приходящейся на одну хвойнку, получена равной 10.6 мг. Различия связаны с несовершенством оценки доли хвои на ветвях, участвующих в задержании капель, слипанием отдельных хвойнок в ходе увлажнения, формированием капель между хвойнками. Авторами выдвигается предположение, что в процессе перехвата осадков участвует не вся крона, а только ее эффективная часть. Данный тезис освещен в ряде исследований (Медведев, 1983), однако требует детального экспериментального подтверждения.

На основе экспериментов по искусственному орошению ветвей разного размера получена эмпирическая зависимость максимальной массы удерживаемой на хвое дождевой воды от площади листовой поверхности (рис. 2).

Для анализа использовано 50 ветвей разных размеров (от побегов текущего года до ветвей первого порядка из разных частей крон) массой от 8 до 2500 г. Получена единая для всех хвойных пород зависимость с коэффициентом аппроксима-

ции, равным 0.98. Учитывая отмеченные физические механизмы удержания капель на хвое, следует ожидать, что масса удерживаемой влаги пропорциональна числу хвойнок и наибольшему возможному размеру капли, удерживаемой на хвое – т.е. установленный ход зависимости в области больших значений LA теоретически обоснован. Для воды, удерживаемой на ветвях, получена собственная линейная зависимость (рис. 2); масса водоудержания незначительна (около 10% массы водоудержания на хвое).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам таксационных работ, выполненных для водосбора р. Решетки, установлено, что водосбор покрыт сосновым лесом возрастом 80–100 лет, средней высотой деревьев 22 м, полнотой насаждения 0.8, численностью деревьев на 1 га, равной 340. Это соответствует II классу бонитета. На основе полученной зависимости (рис. 2) выполнена оценка максимальной массы удерживаемой воды единичными хвойными породами на расчетном водосборе. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Как видно из результатов расчетов, наибольшей способностью к водоудержанию обладает ель обыкновенная (для данного бонитета и возраста – до 58 л воды), а наименьшей – сосна сибирская. Слой начального перехвата осадков достигает 2 мм в расчете на 1 га лесопокрытой площади. С изменением возраста и класса бонитета натуральных древостоев слой перехвата осадков на 1 га может достигать величин 5–8 мм и даже более.

Таблица 3. Расчетная масса максимально возможного удержания дождевых вод на кронах лесообразующих пород (хвойных II класса бонитета, возраст пород – 80 лет, сомкнутость древостоя 0.8)

Вид	F_1 , т га ⁻¹ (в т.ч. древесина кроны)	LAI , м ² м ⁻²	$S_{\text{проект}}$, м ²	LA , м ²	m , кг	h перехвата, мм
Пихта сибирская	36.9	19.4	12.0	233	36.2	3.0
Ель обыкновенная	50.6	29.6	12.6	373	58.0	4.6
Сосна обыкновенная	32.0	15.2	11.2	170	26.4	2.4
Сосна сибирская	36.7	12.2	13.0	159	24.8	1.9

Примечания. 1. По оценкам, выполненным методом Н.И. Казиминова (Грошев Б.И. и др., 1980), величина F_1 для ели получена равной 34.2 т га⁻¹, для сосны – 11.2 т га⁻¹; данные величины представляются заниженными по сравнению со значениями, приведенными в табл. 3. 2. F_1 – величина фитомассы (масса листы), т га⁻¹; LAI – индекс листовой поверхности, м² м⁻²; $S_{\text{проект}}$ – средняя проекционная площадь кроны, м²; LA – площадь листовой поверхности в расчете на крону, м²; m – масса удерживаемой на кроне воды, кг; h – слой удерживаемой на кроне воды в пересчете на проекционную площадь кроны, мм.

Наблюдения над осадками под кронами хвойных (на четырех дождемерах) и на открытой местности (один дождемер), проводившиеся в октябре 2017 г., подтвердили расчетные величины вододержания. По данных полевых дождемеров М-99 установлено, что кроны еловых деревьев (80 лет, II класс бонитета) перехватывают 2–4 мм дождевых осадков. Метеорологические наблюдения требуют продолжения с привлечением самописцев дождя (плювиографов).

Распределение величин (суммы и интенсивности) дождевых осадков, задерживаемых на кронах и расходующихся на испарение, во времени может быть описано моделью, предложенной американскими гидрологами (Виноградов, 1988):

$$P_{\text{п.р}} = (P_c + LAIEt) \left(1 - \exp \left[\frac{-X}{P_c + LAIEt} \right] \right), \quad (7)$$

где $P_{\text{п.р}}$ и P_c – высота слоя задержания и максимальное вододержания кронами на единицу площади бассейна, покрытого растительностью (мм), за расчетный интервал времени t , E – интенсивность испарения с растительного покрова, рассчитанная на единицу площади этой поверхности (мм мин⁻¹); LAI – индекс листовой поверхности (га га⁻¹); t – расчетный интервал времени выпадения дождя (мин); X – количество осадков за расчетный интервал (мм). Величина максимального вододержания может быть оценена на основе эмпирических зависимостей, полученных авторами (рис. 2); остальные параметры определяются на основе данных метеорологических наблюдений. При моделировании гидрографа паводочного стока модель (7) позволяет выполнить дифференцированный расчет величины перехвата во времени.

Но основании разработанных авторами параметров модели перехвата осадков рассчитана кривая потерь дождя (интегральная) с учетом перехвата осадков кронами и испарения с поверхности крон (рис. 3). Кривые хода сумм осадков за ливень во времени (с дискретностью 60 мин) оце-

нены по данным наблюдений плювиографа на метеостанции “Екатеринбург” за период с 1961 по 2015 гг. Оценка величины испарения за время ливня выполнена в соответствии с работой (Голубцов, 2010), на основе данных по температуре, относительной влажности воздуха и скорости ветра по обозначенной метеостанции. Как видно, при наличии на водосборе леса момент начала поступления осадков на поверхность может задерживаться на период от 5 мин (для интенсивных ливней) до 2.5 ч (для малоинтенсивных ливней) по сравнению с открытой местностью, а суммарное количество осадков за дождь под пологом леса оказывается на 17% ниже, чем на открытой площадке. При этом за первые 500 мин дождя кронами перехватывается около 70% слоя осадков, и величина перехвата резко снижается по мере достижения максимального водонасыщения крон, наступающего через 400 мин после начала дождя. В дальнейшем величина перехвата стабилизируется на уровне 8–17%.

Полученная кривая хода поступления осадков под полог леса (за вычетом перехвата на кронах) (рис. 3) может быть использована для расчета гидрографа дождевого стока на модельном водосборе. Подобный расчет выполнен авторами как с учетом потерь осадков на кронах, так и без него. Параметры гидрографа стока определены на основании генетической модели формирования стока КДМФОС-76Б (Голубцов, 2010), основные элементы которой изложены в работе (Виноградов, 1967). Основным принципом используемой модели является то, что интенсивность поверхностного, почвенно-грунтового и грунтового стокообразования определяется как разница объемов дождевых осадков и потерь (на испарение, поверхностное задержание и задержание кронами, инфильтрацию). Трансформация интенсивности стокообразования в гидрографы притока (склоновое стокообразование) и гидрограф стока в замыкающем створе производится на основе оценок времени добега воды по склонам эле-

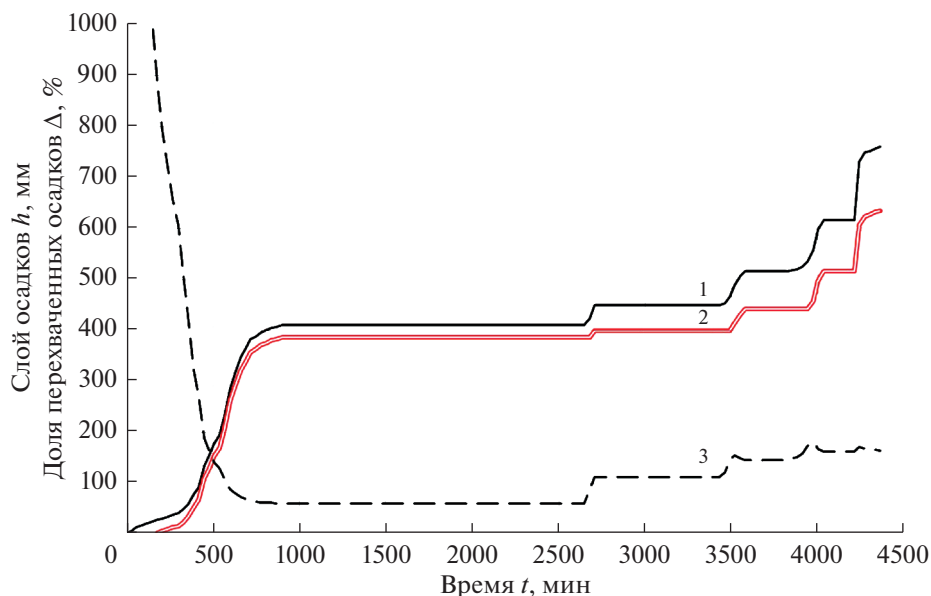


Рис. 3. Интегральные кривые хода дождя по метеостанции “Екатеринбург” за 6–9 июня 2005 г. с учетом (1) и без учета (2) перехвата осадков кронами хвойных пород водосбора р. Решетка и изменение доли перехваченных осадков за расчетный период (3).

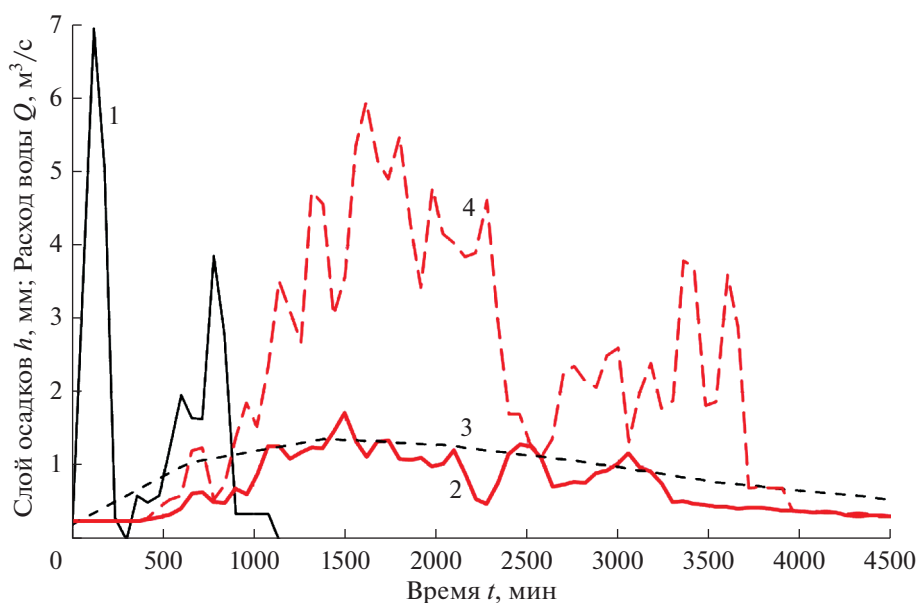


Рис. 4. Смоделированные гидрографы дождевого паводка на малом водосборе (р. Решетка – с. Новоалексеевское) за 6–9 июня 2005 г. с учетом и без учета перехвата осадков кронами хвойных пород водосбора (1 – сумма осадков, мм; 2 – расчетный гидрограф с учетом перехвата осадков, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$; 3 – наблюдаемый гидрограф, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$; 4 – расчетный гидрограф без учета перехвата осадков, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$).

ментарных водосборов и русловым участкам гидрографической сети водосбора.

Выполнено сопоставление расчетного гидрографа с наблюдаемым на посту Росгидромета “р. Решетка–с. Новоалексеевское”. Как видно из

рис. 4, учет перехвата осадков кронами способствует наилучшему совпадению расчетного гидрографа стока с наблюдаемым: максимальный наблюдаемый расход воды на р. Решетке для ливня, датированного 6–9 июня 2005 г., составляет $1.34 \text{ м}^3 \text{с}^{-1}$; максимальный расчетный без учета

потерь осадков на кронах — $5.95 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$; с учетом потерь — $1.72 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$. В данном случае следует подчеркнуть, что водосбор рассматриваемой реки покрыт сосновым лесом лишь частично (87% лесопокрытой площади; оставшиеся 13% в расчетах водоудержания не учтены). Потому полученные результаты расчета гидрографов следует рассматривать как положительный опыт применения модели перехвата осадков в расчетах паводочного стока (погрешности расчета максимального расхода снижаются с 344 до 28%), нежели как конечные оценки. Конечные оценки могут быть даны после разработки физических основ удержания влаги листовыми породами, над которыми работают авторы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным исследования, максимальные значения слоя осадков единичного ливня, перехваченного хвойными породами, варьируют от 1.7 до 5 мм; отдельное дерево может удерживать от 25 до 50 л, в зависимости от породы, площади листовой поверхности и таксационных характеристик. Удержание воды осуществляется только в капельном виде на концах хвоинок, в нижней части ветвей. Максимальный размер капли, покоящейся в нижней части отдельной хвоинки, достигает массы 15.6 мг; средний максимальный размер капли на ветвях составляет 12.9 мг; капля, заключенная между группой хвоинок, может достигать величины 18.6 мг.

На основании экспериментов по искусственному орошению ветвей установлены параметры зависимости между площадью листовой поверхности (LA , м^2) и максимальной массой удерживаемой на хвое воды (m , г): $m = 4.07LA^2 + 132LA + 0.95$. На основе полученной зависимости и данных по площадям листовой поверхности расчетных водосборов появляется возможность рассчитать величину перехвата за время выпадения дождя, а также потери на испарение с площади кроны.

По данным наблюдений на метеостанции “Екатеринбург” и результатам расчетов на ближайшем экспериментальном водосборе, оборудованном гидрологическим постом Росгидромета (“р. Решетка—с. Новоалексеевское”, площадь водосбора $F = 32.0 \text{ км}^2$) установлено, что интенсивные ливневые осадки за первые 5–20 мин дождя почти полностью перехватываются кронами. Т.е. под кронами момент начала дождя запаздывает по сравнению с открытыми пространствами. За последующие 20–90 мин перехватывается около 70% суммы осадков, выпавших за это время. С увлажнением крон величина потеря осадков на перехват плавно снижается: при продолжительности дождей более 5–12 ч (в зависимости от интенсивности) величина перехвата осадков крона-

ми снижается до 28–7%. Дальнейшие потери осадков на кронах следует считать установившимися на уровне 8% от суммы осадков, выпадающих за 10-минутные интервалы. Данные потери связаны с испарением удерживаемой влаги с общей площади листовой поверхности крон, превышающей проекционную площадь в 14–20 раз (при пренебрежимо малой транспирации древесными и травяными фитоценозами за время дождя).

Полученные зависимости могут быть использованы при моделировании паводочного стока малых рек лесной зоны Урала. Учет величины безвозвратных потерь осадков на кронах древостоев позволяет существенно повысить точность расчетов паводочного стока малых рек генетическими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов Ю.Б.* Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 262 с.
- Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
- Голубцов В.В.* Моделирование стока горных рек в условиях ограниченной информации. Алматы: МООС РК, РГП “КАЗГИДРОМЕТ”, 2010. 232 с.
- Грошев Б.И., Сеницын С.Г., Мороз П.И., Сеперович И.П.* Лесотаксационный справочник. М.: Лесная пром., 1980. 288 с.
- Клименко Д.Е., Епончинцева Д.Н., Корепанов Е.П., Черепанова Е.С.* Исследование кривых редукции паводкоформирующих ливневых осадков Зауралья // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 76–89.
- Лархер В.* Экология растений: пер. с нем. М.: Мир, 1978. 384 с.
- Лохов Д.П.* Учет осадков, задерживаемых лесом, методом дождевания // Метеорология и гидрология. 1938. № 6. С. 97–104.
- Лучшев А.А.* Осадки под пологом леса // Тр. Всесоюз. НИИ лесн. хоз-ва. 1940. Вып. 18. С. 113–148.
- Медведев Л.В.* Принципы изучения перераспределения атмосферных осадков древостоем // Теоретические основы и опыт экологического мониторинга. М.: 1983. С. 118–138.
- Медведев Л.В.* Закономерности перераспределения атмосферных осадков и трансформации их химического состава древостоями южной тайги (на примере Валдайской возвышенности): Дис. ... канд. биол. наук (03.00.16). М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1984. 242 с.
- Молчанов А.А.* Гидрологическая роль леса. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 454 с.
- Молчанов А.А.* Лес и климат. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 278 с.
- Морозов Г.Ф.* Учение о лесе. М.: Гослесбуиздат, 1959. 456 с.
- Онуцин А.А.* Влагодобор горных лесов Сибири (локальные и региональные особенности): Дис. ... д-ра биол.

наук (03.00.16). Красноярск, Институт леса им. В.Н. Сукачева РАН, 2003. 222 с.

Поляков А.Ф. Водорегулирующая роль горных лесов Украины и пути ее оптимизации при ведении хозяйства: автореф. Дис. ... д-ра с.-х. наук. (07.00.00). Киев, Укр. НИИ лесного хозяйства и агролесомелиорации им. Г.Н. Высоцкого, 1984. 36 с.

Рахманов В.В. Лесная гидрология (сер. Итоги науки и техники. Лесоведение и лесоводство. Т.3). М.: изд-во ВИНТИ, 1981. 181 с.

Субботин А.И. Влияет ли лес на осадки? // Лесоведение. 1979. № 5. С. 13–18.

Уткин А.И., Ермолова Л.С., Замолодчиков Д.Г. Конверсионные коэффициенты для определения площади листовой поверхности насаждений основных лесобразующих пород России // Там же. 1997. № 3. С. 74–78.

Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 290 с.

Швиденко А.З., Шепашченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.

Чубатый О.В. Водоохронні гірські ліси. Ужгород: Карпати, 1972. 119 с.

Bele J. Príspevek ke zjistikani strat vody intercepčnim výparem ve smrkových porostech // Lesnictví. 1975. Roc. 21(48). P. 633–652.

Bele J. Tvorba zasob snihuve smrkove hospodarske skupine // Lesnictví. 1980. Roc. 26(53). P. 729–736.

Zhao Pan, Weyer F., Pitt W.G., Vandewalle N., Truscott T.T. Drop on a bent fibre // Soft Matter. V. 14(19). 2018. P. 3724–3729.

Modeling of the Rainfall Losses in the Coniferous Trees Crowns

D. Ye. Klimenko^{1,*} and A. L. Ostakhova¹

¹Perm State University, Bukireva st., 15, Perm, 614990 Russia

*E-mail: listopad19531@mail.ru

The maximum runoff of rain water into small rivers of the Ural's forest zone is largely determined by the characteristics of rainfall and the rate of their retention in the crowns of coniferous forest stands. The article presents the results of physical (experimental) modeling of the process of the retention of water droplets on needles and the meteorological observations of precipitation under the crowns of conifers. It was established that water is retained on needles only in a droplet form; droplet sizes held on one needle vary from 10.6 to 18.6 mg. Based on experiments on branch watering, a common dependence of the maximum mass of retained moisture on the area of the leaf surface was derived, characterized by a correlation coefficient of 0.98. The maximum mass of water retention on the crowns of single trees varies from 24.8 to 58.0 kg, or from 1.9 to 4.6 mm, calculated for a projection area of the crown. The experimental and calculated data are confirmed by the results of observations of the amount of precipitation under the crowns of conifers. Actual water interception values during rain turn are larger due to moisture losses due to evaporation from the leaf surface of the crowns. The methodology was developed and the process of water interception by coniferous stands during the rain was simulated. For a simulated hydrological basin, rainfall of the first 5–20 minutes of rain is almost completely intercepted by crowns. Over the next 20–90 minutes, about 70% of the amount of precipitation is intercepted. With the increase of the crowns' water content, the amount of precipitation loss on interception gradually decreases: with a rain duration of more than 5–12 hours (depending on the intensity), the amount of precipitation intercepted by crowns decreases to 28–7%. Further losses of precipitation on the crowns stabilize at 7%. Based on the developed model of intercepting rainfall by genetic methods, the hydrograph of a single rain flood for a model basin of a Reshetka river was calculated (according to the model KDMFOS-76B). Accounting for precipitation losses due to rainfall retention by crowns allows to reduce the marginal errors in calculating the maximum water losses from 126 to 25%.

Keywords: forest hydrology, hydrological calculations, rainfall water, modeling, rainfall, rainfall retention by tree crowns.

REFERENCES

Larkher V., *Ekologiya rastenii* (Plant ecology), Moscow: Progress, 1978, 185 p.

Molchanov A.A., *Gidrologicheskaya rol' lesa* (Hydrological contribution of forest), M.: Izd-vo AN SSSR, 1960, 487 p.

Molchanov A.A., *Les i klimat* (Forest and climate), M.: Izd-vo AN SSSR, 1961, 278 p.

Morozov G.F., *Uchenie o lese* (Study of forest), M.: Goslesbumizdat, 1959, 456 p.

Utkin A.I., Ermolova L.S., Utkina I.A., *Ploshchad' poverkhnosti lesnykh rastenii: sushchnost', parametry, ispol'zovanie* (The surface area of forest plants: essence, parameters, use), M.: Nauka, 2008.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'son S., Bului Y.I., *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii: normativno-spravochnye materialy* (Tables and models of growth and productivity of forests of major forest

- forming species of Northern Eurasia), M.: Izd-vo Rosleskhoz, ИАASA, 2008, 886 p.
- Bele J., Prispevek ke zjistikani strat vody intercepncnim vyparem ve smrkovych porostech, *Lesnictvi*, 1975, Vol. 21(48), pp. 633–652.
- Bele J., Tvorba zasob snihuve smrkove hospodarske skupine, *Lesnictvi*, 1980, Vol. 26(53), pp. 729–736.
- Zhao P., Weyer F., Pitt W.G., Vandewalle N., Truscott T.T., Drop on a bent fibre, *Soft Matter*, 2018, Vol. 14(19), pp. 3724–3729.
- Vinogradov Y.B., *Voprosy gidrologii dozhdevykh pavodkov na malykh vodosborakh Srednei Azii i Yuzhnogo Kazakhstana* (Issues of hydrology of rain floods in small water-producing areas of Central Asia and South Kazakhstan), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967, 262 p.
- Vinogradov Y.B., Matematicheskoe modelirovanie protsessov formirovaniya stoka (Mathematical modeling of runoff formation), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 312 p.
- Golubtsov V.V., Modelirovanie stoka gornyykh rek v usloviyakh ogranichennoi informatsii (Modeling the flow of mountain rivers in conditions of limited information), Almaty: MOOS RK, RGP “KAZGIDROMET”, 2010.
- Groshev B.I., Sinitsyn S.G., Moroz P.I., Seperovich I.P., Lesotaksatsionnyi spravochnik (Forest Taxation Guide), M.: Lesnaya promyshlennost', 1980, 288 p.
- Klimenko D.E., Eponchintseva D.N., Korepanov E.P., Cherepanova E.S., Issledovanie krivykh reduksii pavodkoformiruyushchikh livnykh osadkov Zaural'ya (Study of the reduction curves of flood-forming rainfall in the Trans-Urals), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2018, No. 2, pp. 76–89.
- Lokhov D.P., Uchet osadkov, zaderzhivaemykh lesom, metodom dozhdevaniya (Accounting for rainfall held by the forest using sprinkling method), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1938, No. 6, pp. 97–104.
- Luchshev A.A., Osadki pod pologom lesa (Rainfall under the forest canopy), *Tr. Vsesoyuz. NII lesn. khoz-va*, 1940, Vol. 18, pp. 113–148.
- Medvedev L.V., Printsipy izucheniya pereraspredeleniya atmosfernykh osadkov drevostoeom (Principles of studying the redistribution of precipitation by tree stands), In: *Teoreticheskie osnovy i opyt ekologicheskogo monitoringa* (Theoretical basis and experience of environmental monitoring), M.: 1983, pp. 118–138.
- Medvedev L.V., *Zakonomernosti pereraspredeleniya atmosfernykh osadkov i transformatsii ikh khimicheskogo sostava drevostoyami yuzhnoi taigi (na primere Valdaiskoi vozvyshehnosti)*. Diss. kand. biol. nauk (Regularities of redistribution of atmospheric precipitation and transformation of their chemical composition by stands of the southern taiga (Valdai Upland). Candidate's biol. of sci. thesis), M.: MGU im. M.V. Lomonosova, 1984, 242 p.
- Onuchin A.A., *Vlagooborot gornyykh lesov Sibiri (lokal'nye i regional'nye osobennosti)*. Diss. d-ra biol. nauk (Moisture in the mountain forests of Siberia (local and regional features). Doctor's biol. sci. thesis), Krasnoyarsk: Institut lesa im. V.N. Sukacheva RAN, 2003, 222 p.
- Polyakov A.F., *Vodoreguliruyushchaya rol' gornyykh lesov Ukrainy i puti ee optimizatsii pri vedenii khozyaistv*. Avtoref. Dis. d-ra s.-kh. nauk. (The water-regulating role of the mountain forests of Ukraine and the ways of its optimization in housekeeping: abstract. Extended abstract of Doctor's of agric. sci. thesis), Kiev: Ukr. NII lesnogo khozyaistva i agrolesomelioratsii im. G.N. Vysotskogo, 1984, 36 p.
- Rakhmanov V.V., *Lesnaya gidrologiya* (Forest hydrology), M.: Izd-vo VINITI, 1981, Vol. 3, 181 p.
- Subbotin A.I., Vliyaet li les na osadki? (Does the forest affect rainfall?), *Lesovedenie*, 1979, No. 5, pp. 13–18.
- Utkin A.I., Ermolova L.S., Zamolodchikov D.G., Konversionnye koeffitsienty dlya opredeleniya ploshchadi listovoi poverkhnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Rossii (Conversion coefficients for determining the area of the leaf surface of the main forest-forming species of Russia), *Lesovedenie*, 1997, No. 3, pp. 74–78.
- Chubatyi O.V., *Vodookhronni ripc'li lisi* (Water conservation forests), Uzhgorod: Karpati, 1972, 119 p.