

Теплообмен и тепловой баланс бурых лесных почв под букняками

Николай Александрович Битюков

Сочинский государственный университет, Россия
доктор биологических наук, профессор
E-mail: nikbit@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментального изучения теплового режима и теплового баланса бурых лесных почв под буковыми насаждениями в среднегорной зоне Черноморского побережья Кавказа. Материалы получены на малых водосборах лесогидрологического стационара «Аибга». Выполнено сравнение теплового режима почв в лесу и на вырубке.

УДК 630*
228(23)

Ключевые слова: физические свойства почвы, тепловой баланс почвы, буковые леса, Черноморское побережье Кавказа.

Теплообмен в почве представляет собой процесс взаимного обмена тепла между поверхностью почвы и нижележащими слоями, происходящий в результате разности температур. Как указывает В.Н. Димо (1963), представление о теплообмене в почве можно получить при сопоставлении и взаимной увязке наблюдений за температурным режимом с показателями основных тепловых характеристик по генетическому профилю.

Исследования теплофизических характеристик почвы (Иконникова, 1960; Чичуа, 1963, 1955; Каганов, Чудновский, 1948 и др.) показывают, что важнейшими факторами, влияющими на теплофизические характеристики, являются влажность почвы и ее плотность. При изменении этих факторов во времени и пространстве изменяются и теплофизические характеристики. Следовательно, для достаточно достоверной оценки основных теплофизических характеристик почвы требуются данные о влажности и плотности почвы, их распределении по площади и во времени. Зависимость этих характеристик от влажности нелинейная, а с увеличением плотности они увеличиваются линейно.

Методы определения тепловых характеристик почв рассмотрены в работах Д.Л. Лайхтмана (1947), А.Ф. Чудновского (1948, 1958), Г.Д. Цейтина (1952, 1953) и др. Для расчета коэффициента температуропроводности почвы (К) Г.Х. Цейтин (1953) предлагает следующую формулу:

$$K = \frac{\int_0^H [T(z, \tau) - T(z, 0)] dz}{\int_0^t [T(0, \tau) - T(h, \tau)] \times dt + h \int_0^t \frac{T(H, \tau) - T(h, \tau)}{H - h} d\tau} = \frac{M_1}{N_1} = \frac{\frac{M}{H - h}}{\frac{N}{H - h}}, \quad (1)$$

где:

$$U(z) = \begin{cases} z & \text{при } 0 \leq z \leq h \\ h : (H - h)(H - z) & \text{при } h \leq z \leq H \end{cases} \quad (2)$$

T – температура; z – глубина (z = 0 поверхность почвы); h и H – две глубины в почве; t – время (τ – переменное время, меняющееся от τ = 0 до τ = t).

Вычислять коэффициент температуропроводности по этой формуле Г.Х. Цейтин предлагает аналитическим или графическим способами.

Нами использован, как наименее трудоемкий, графический способ определения коэффициента температуропроводности, состоящий в замене интегралов формулы (1) соответствующими площадями, измеряемыми планиметром. Г.Х. Цейтин для удобства

вычислений вместо переменной z вводит новую переменную $\varphi(z)$, определяемую из соотношений $d\varphi(z) = U(z)$, $\varphi(z)|_{z=h+0}$:

$$U(z) = \begin{cases} \frac{z^2}{2} & \text{при } 0 \leq z \leq h \\ \frac{h}{2} \left[H - \frac{(H-h)^2}{(H-h)} \right] & \text{при } h \leq z \leq H \end{cases} \quad (3)$$

Тогда формула (3) будет выглядеть следующим образом:

$$K = \frac{\int_0^H [T(z,t) - T(z,0)] d\varphi(z)}{\int_0^t [T(0,\tau) - T(h,\tau)] + h \int_0^t \frac{T(H,\tau) - T(h,\tau)}{H-h} d\tau} \quad (4)$$

Вычисление коэффициента температуропроводности осуществлено на основании наблюдений температурного поля в метровом слое почвы в лесу и на вырубке. Поскольку суточные изменения температуры даже для поверхностных слоев незначительны, оказалось невозможным определить коэффициент температуропроводности по ежечасным наблюдениям; поэтому были взяты более длительные периоды наблюдений – от 7 до 15 дней. Причем периоды эти были выбраны с соблюдением следующих двух условий: 1) изменение влажности почвы в течение периода невелико; 2) нагревание почвы происходит равномерно. Для расчета теплофизических характеристик весь метровый профиль почвы был разделен на 3 слоя. Верхний 20-сантиметровый слой характеризуется наибольшим изменением плотности почвы – в среднем по участку от 0,60 до 1,06 г/см³ в пределах слоя. Второй слой, проходящий на глубине 20–50 см, имеет бóльшую плотность – от 1,06 до 1,20 г/см³, а третий слой (50–100 см) – еще плотнее (от 1,20 до 1,30 г/см³). Для каждого слоя коэффициент температуропроводности определяли отдельно (рис. 1).

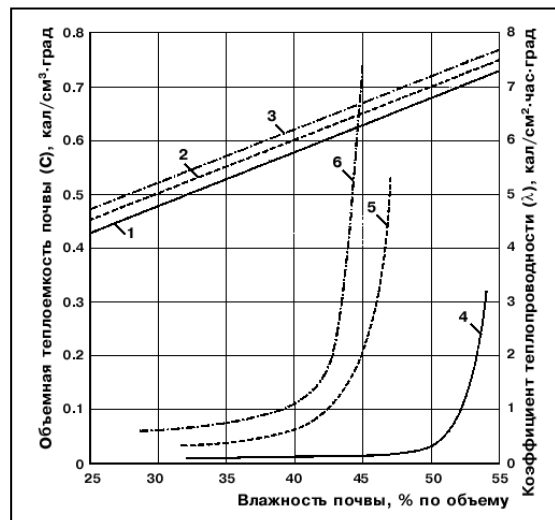


Рис. 1. Зависимость теплофизических свойств почвы от ее влажности под пологом буковых насаждений

1 и 4 – слой почвы 0–20 см, 2 и 5 – слой почвы 20–50 см, 3 и 6 – слой почвы 50–100 см

В результате расчетов коэффициента температуропроводности были получены эмпирические кривые зависимости K от влажности почвы. Эти кривые подтверждают те общие закономерности изменения теплофизических характеристик почвы, которые рассмотрены выше в обзоре литературы, однако здесь имеются и свои особенности. Прежде всего обращает на себя внимание очень низкая температуропроводность верхнего 20-сантиметрового слоя, что можно объяснить очень малой его плотностью и наличием на поверхности почвы теплоизолирующей лесной подстилки. В среднем слое (20–50 см) температуропроводность уже значительно больше – почти в 5 раз (при влажности 40 %), а в

нижнем полуметровом слое – более чем в 8 раз превышает теплопроводность поверхностного горизонта.

Интенсивный рост коэффициента теплопроводности для каждого слоя наблюдается при разных величинах влажности: для слоя 0–20 см – 48 %, для слоя 20–50 см – 38, для слоя 50–100 см – 34–36 %. Это объясняется тем, что полное влагонасыщение для каждого слоя наступает при разной влажности.

Кривые теплопроводности продлены до значений влажности, практически совпадающей с наименьшей полевой влагоемкостью каждого слоя. Однако эти кривые имеют тенденции дальнейшего роста при увеличении увлажнения и появлении свободной гравитационной влаги.

Для сравнения тепловых свойств почвы под пологом не тронутых рубкой насаждений и на вырубках приводятся результаты расчетов коэффициентов теплопроводности по наблюдениям на метеоплощадках “вырубка”, “у стены леса” и “под пологом леса” (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты теплопроводности различных горизонтов почвы под пологом леса, у стены леса и на вырубке, кал/см² · ч (ЛГС “Аибга”)

Периоды	Слой 0-20 см	Слой 0-30 см		Слой 50-100 см	Слой 50-90 см	
	под пологом леса	у стены леса	на вырубке	под пологом леса	у стены леса	на вырубке
20-30.IV.1968 г.	0,19	0,30	0,34	1,92	2,11	1,01
1-15.V.1968 г.	0,15	0,30	0,10	2,05	2,15	1,48
15-28.VIII.1968 г.	0,25	0,34	0,27	1,13	1,41	–
6-16.IV.1967 г.	0,62	0,76	1,16	11,00	4,97	–
6-13.VI.1967 г.	1,01	0,96	1,01	3,88	3,16	1,44

Наибольшие различия коэффициентов теплопроводности между вырубкой и не затронутым рубкой лесом наблюдаются в поверхностном 20–30-сантиметровом слое: под пологом теплопроводность этого слоя в 1,5–2 раза ниже, чем на вырубке. Более плотные глубокие слои имеют значительно меньшие различия в теплопроводности. Разница здесь обусловлена в основном особенностями режима влажности почвы под пологом леса и на вырубках.

Объемная теплоемкость почвы под пологом леса на стационаре “Аибга” была рассчитана по данным средней плотности и влажности отдельных горизонтов. В результате получена зависимость объемной теплоемкости от влажности, имеющая прямолинейный вид.

Исходя из соотношения между коэффициентами теплопроводности (K) и теплопроводности (λ), а также объемной теплоемкостью (C):

$$K = \frac{\lambda}{C}, \quad (5)$$

для каждого из 3-х горизонтов почвы получены кривые зависимости коэффициентов теплопроводности от влажности почвы.

Совмещенный график зависимости термических характеристик от влажности приведен на рис. 1. Поскольку объемная теплоемкость имеет линейную связь с влажностью, вид кривых теплопроводности определяется кривыми теплопроводности. Таким образом, в отношении теплофизических свойств бурые лесные почвы под буковыми лесами имеют свои особенности. Они обладают сравнительно большой объемной теплоемкостью, мало различающейся по глубине профиля, но возрастающей с увеличением влажности: при увеличении влажности в 2 раза теплоемкость становится больше почти на 1/3 первоначальной величины. Теплопроводность этих почв очень мала в поверхностном горизонте и очень резко увеличивается с глубиной. Верхний 20-сантиметровый слой, имеющий большую пористость и содержащий много органических веществ, играет роль теплоизолятора. Такую же функцию выполняет и мощный слой лесной подстилки, состоящий из листьев, веток и плюски бука.

На основании полученных данных о теплофизических свойствах бурых лесных почв и результатов наблюдений за температурой почвы рассчитан тепловой поток в почву под пологом леса в течение вегетационных периодов 1966–1969 гг. Для величины теплового потока в почву за некоторый промежуток времени t :

$$Q(t) = \int_0^t \left\{ -C_1 K \frac{\partial T(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} \right\} d\tau. \quad (6)$$

Г.Х. Цейтиным (1953) было получено следующее выражение (при вычислении графическим способом):

$$Q(t) = C_1 \int_0^H [T(z, t) - T(z, 0)] d\psi(z) - \frac{C_1 K}{H - h} \int_0^t [T(H, \tau) - T(h, \tau)] d\tau, \quad (7)$$

где:

$$\psi(z) = \begin{cases} z & \text{при } 0 < z < h \\ z - \frac{(z - h)^2}{2(H - h)} & \text{при } h < z < H \end{cases}; \quad (8)$$

C_1 – объемная теплоемкость.

По формуле (7) графическим способом был произведен расчет месячных величин теплового потока в почву под пологом леса. Для этого были приняты значения $H = 100$ см и $h = 10$ см, а средние теплоемкость и теплопроводность были определены из величин этих характеристик для каждого из 3-х горизонтов (0–20 см, 20–50 см и 50–100 см), найденных по влажности почвы из приведенных выше графиков.

Результаты расчетов теплового потока в почву приводятся в табл. 2. Полученные величины теплопотока имеют как положительный знак (нагревание почвы весной и летом), так и отрицательный (охлаждение осенью и зимой). Поскольку наблюдения за температурой почвы не охватывают всю глубину, до которой распространяются годовые температурные колебания, а сосредоточены лишь в метровом слое, сумма положительного теплопотока за год не равна отрицательному теплопотоку. Наиболее интенсивное нагревание метрового слоя почвы отмечается ранней весной (апрель), и положительный теплопоток в почву в это время достигает максимальных значений. Это обусловлено наибольшей проницаемостью полога в апреле (по сравнению с остальной частью вегетационного периода) при значительной суммарной солнечной радиации и максимальной теплопроводности. В дальнейшем теплопоток в почву уменьшается, и с сентября начинается охлаждение почвы.

Следует отметить, что конкретные погодные условия каждого вегетационного периода обуславливают свои особенности поступления тепла в почву. Наибольшее влияние при этом оказывают осадки. Так, сумма теплопотока за вегетационный период 1966 г. составила 309 кал/см² при осадках за этот период 1232 мм; в 1967 г. – 544 кал/см² при осадках 995 мм; в 1968 г. – 351 кал/см² при осадках 1111 мм. По-видимому, вместе с внутрипочвенным стоком из метрового слоя уходит значительное количество тепла.

Таблица 2

Тепловой поток в почву под пологом леса на стационаре “Аибга”, кал/см²

Месяц	Год			
	1966	1967	1968	1969
I	–	-248	–	-81
II	–	-160		16
III	-17	74	–	16
IV	218	134	160	175
V	66	165	146	59
VI	56	186	132	95

VII	97	73	27	67
VIII	-4	77	100	73
IX	-81	-85	-132	-167
X	-43	-6	-82	-164
XI	-79	–	-5	-6
XII	-248	–	-203	-94
Сумма за вегетационный период (IV–X)	309	544	351	138

Если сравнить коротковолновый баланс солнечной радиации под пологом леса с количеством тепла, уходящим в почву, то оказывается, что теплопоток в почву очень невелик, в отдельные месяцы он колебался: в 1966 г. – от 9,0 до 13,4%, в 1967 г. – от 9,9 до 28,0, в 1968 г. – от 3,4 до 19,5, в 1969 г. – от 9,1 до 12,8 %. Сумма положительного теплопотока за вегетацию в эти 4 года составила 10,4–11,9 % суммы коротковолнового баланса в лесу за месяцы с положительным теплопотоком. Наибольшее охлаждение наблюдалось в декабре–январе при наличии устойчивого снежного покрова. Расходование тепла из почвы в таких случаях довольно устойчиво и достигает 203–248 кал/см² за месяц.

По результатам определения радиационного баланса, теплообмена в почве и испарения с почвы представляется возможным, используя уравнение 7, определить тепловой баланс почвы под пологом леса за теплый период (табл. 3).

Затраты тепла на испарение рассчитаны по величинам, измеренным почвенными испарителями ГТИ-500-50. Турбулентный теплообмен определен как остаточный член теплового баланса.

Таблица 3

Тепловой баланс почвы под пологом буковых насаждений (ЛГС “Аибга”)

Элементы теплового баланса*	Суммы за месяц, кал/см ²							За вегета- ционный период
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1966 год								
B _п	1620	660	620	790	620	590	1240	5600
LE _п	1190	980	590	980	720	460	670	5590
C _п	218	66	56	97	-4	-81	-43	309
P _п	212	-386	-26	-287	-104	211	613	-319
1967 год								
B _п	1690	590	730	740	630	550	1070	5440
LE _п	1140	1420	650	570	920	620	670	5640
C _п	134	165	186	73	77	-85	-6	544
P _п	416	-995	-106	97	-367	15	406	-744
1968 год								
B _п	1870	750	760	790	590	450	890	6100
LE _п	490	320	630	1010	710	710	920	4800
C _п	160	146	132	27	100	-132	-82	351
P _п	1220	284	-2	-247	-220	-128	52	949

Элементы теплового баланса*	Суммы за месяц, кал/см ²							За вегета- ционный период
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1969 год								
B _п	1790	650	740	700	610	530	950	4780
LE _п	1520	2020	890	330	600	940	680	4730
C _п	175	59	95	67	73	-167	-164	138
P _п	96	-1429	-245	303	-63	-243	434	-88

* B_п – радиационный баланс почвы; LE_п – затраты тепла на испарение с почвы; C_п – тепловой поток в почву; P_п – турбулентный теплообмен.

Как следует из табл. 3, тепловой баланс поверхности почвы в девственном буковом насаждении характеризуется очень малыми значениями как приходной, так и расходной частей. Приход, т.е. радиационный баланс, в начале и конце вегетационного периода, когда проницаемость полога достаточно велика, распределяется по статьям расхода следующим образом: на испарение уходит 54–85 %, на нагревание почвы – 10–13, на турбулентный теплообмен с приземным слоем воздуха – 5–49 %. При облиственном пологе радиация расходуется на испарение с почвы и дополнительно поглощается из теплового баланса крон 0,2–1,0 ккал/см² за счет турбулентного теплообмена в подкroновом пространстве.

С учетом полученных данных в табл. 3 приводится тепловой баланс полога букового насаждения, не затронутого рубками. Здесь радиационный баланс полога (B_k) определен как разность радиационного баланса над пологом и баланса поверхности почвы. Расчет транспирации и перехвата выполнен по наблюдениям. Сумма турбулентного теплообмена и аккумуляции тепла в биомассе ($P_d + C_d$) приведена с учетом отрицательного теплообмена у почвы (P_n).

Таблица 4

Тепловой баланс полога букового древостоя (ЛГС “Аибга”)

Элементы теплового баланса*	Суммы за месяц, кал/см²							За вегетационный период
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1966 год								
B _к	4,97	11,20	10,49	14,28	11,40	8,93	5,34	64,77
LE _м	1,62	3,96	3,46	4,97	4,01	3,35	2,83	24,21
LH _к	1,60	1,37	1,81	0,66	1,65	0,96	0,17	8,10
P _д +C _д	1,75	5,48	5,19	8,36	5,64	4,62	2,34	32,14
1967 год								
B _к	4,94	9,60	12,73	13,05	11,76	8,40	4,77	63,69
LE _м	1,98	4,24	3,71	3,95	3,57	3,10	1,65	22,20
LH _к	0,92	1,24	1,09	1,26	1,09	0,98	0,70	7,23
P _д +C _д	2,04	3,12	7,82	7,84	6,73	4,32	2,42	33,52
1968 год								
B _к	5,42	12,31	12,89	13,89	10,92	6,69	4,06	66,18
LE _м	1,24	5,80	4,55	5,32	4,19	4,48	1,24	26,82
LH _к	0,82	0,50	1,28	0,43	1,26	1,09	1,87	7,47
P _д +C _д	3,36	6,01	7,06	7,89	5,25	1,00	0,95	31,89
1969 год								
B _к	5,54	10,73	12,70	12,28	11,82	7,53	3,69	60,62
LE _м	0,50	3,40	4,61	3,58	4,01	2,02	1,65	19,67
LH _к	0,71	1,12	0,97	1,00	1,09	0,65	1,25	6,33
P _д +C _д	4,33	4,78	6,88	7,70	6,66	4,62	0,89	34,53

* B_k – радиационный баланс полога; LE_m – расход тепла на транспирацию; LN_k – расход тепла на испарение перехвата осадков; P_d – турбулентный теплообмен; C_d – аккумуляция тепла в биомассе.

Анализ табл. 4 позволяет оценить состояние элементов теплового баланса полога в вегетационный период. Так, на транспирацию приходится ежемесячно 29,1–47,1 % радиационного баланса крон, на теплообмен с воздухом и в биомассе – 15,0–78,2 %. Как видим, соотношение расходных составляющих баланса весьма значительно варьирует, причем более устойчив расход тепла на транспирацию. За отдельные вегетационные периоды транспирация составила 32,5–40,5 %, теплообмен – 48,2–56,9, испарение перехвата осадков – 10,5–12,5 %.

В среднем за 4 вегетационных периода из радиационного баланса полога, равного 58,81 ккал/см², на транспирацию уходит 36,3 %, на испарение перехвата – 11,4, на турбулентный теплообмен и нагревание биомассы – 51,8 %. Кроме того, из теплового баланса крон на испарение с почвы расходуется около 0,5 %.

Тепловой баланс поверхности почвы в лесу в среднем в 10,7 раз меньше баланса полога древостоя, и уходит он почти целиком на испарение с почвы. Благодаря такому соотношению приходных частей баланса, испарение пологом также значительно (в 4,5 раза) превышает испарение с почвы.

Отмеченные особенности радиационного и теплового балансов букового древостоя являются причиной своеобразного режима элементов микроклимата воздуха и почвы под пологом букняков и обуславливают их водный режим и почвообразовательный процесс.

Примечания:

1. Битюков Н.А. О климатической и гидрологической роли буковых лесов Черноморского побережья Кавказа // Известия выс. уч. заведений: Лесной журнал. 1970. № 5. С. 141-143.
2. Битюков Н.А. Исследование водного и теплового режимов буковых лесов Черноморского побережья Кавказа // Автореф. дисс. ... канд. географ. наук. МГУ. М., 1972. 24 с.
3. Битюков Н.А. Экология горных лесов Причерноморья. Сочи: ФГУ НИИгорлесэкол, 2007. 397 с.; Bityukov N.A., Pestereva N.M., Shagarov L.M. GIS-based Environmental Monitoring of Montane Forest Ecosystems in Protected Areas // European Researcher, 2012, Vol.(27), № 8-2. P. 1293-1298.
4. Коваль И.П., Битюков Н.А. Экологические основы пользования лесом на горных водосборах. Краснодар, 2001. 408 с.
5. Лайтхман Д.Л. О точном методе получения коэффициента температуропроводности почвы // Труды ГГО, 1947. Вып. 2. С. 42-51.
6. Мосияш А.С., Луговцов А.М. Агроклиматическая характеристика Большого Сочи. Ростов-на-Дону. 1967. 63 с.
7. Небольсин С.И. Тепловой режим почв // Труды Ин-та геофизики. 1925. С. 60-65.
8. Раунер Ю.Л. К методике определения составляющих теплового баланса леса // Сборник «Тепловой баланс леса и поля». Изд. АН СССР, М., 1962. С. 72-80.
9. Рубинштейн Е.С. Некоторые данные о термическом режиме почвы // Почвоведение, 1960. № 10. С. 70-75.
10. Смирнов А.И. О тепловом потоке в почву // Сборник «Научных трудов Ивановского с.-х. ин-та». Вып. 23. 1967. С. 65-70.
11. Тихонравова П.И. Изменение процесса теплообмена в дерново-подзолистых суглинистых почвах при антропогенном воздействии /Тезисы докладов II съезда общества почвоведов. 1996 г. Санкт-Петербург, С. 118-119.
12. Храмченкова Р.Х. Физико-структурные характеристики почвы и их влияние на энерго-массообмен между почвой и нижней атмосферой: Дис. ... канд. ф-м. наук: 25.00.29. Казань, 2006. 120 с.; ил. РГБ ОД, 61 06-1/1048.
13. Цейтин Г.Х. К вопросу об определении некоторых тепловых свойств почвы // Труды ГГО, вып. 39 (101). Л.: Гидрометеиздат, 1953. С. 36-45.
14. Цейтин Г.Х. О вычислении коэффициентов температуропроводности и потока тепла в почву по осредненным температурам //Труды ГГО. Вып. 60 (122). 1956. С. 30-40.
15. Чудновский А.Ф. Физика теплообмена в почве. Л.-М.: Гостехиздат, 1948. 150 с.

Heat Exchange and Heat Balance of Brown Forest Soils under Beech Tree Forest

Nikolai A. Bityukov

Sochi State University, Russia
Dr. (biological), Professor
E-mail: nikbit@mail.ru

Abstract. The article features the results of experimental research of heat regime and heat balance of the brown forest soils under the beech tree forests in the mid-mountain areas of the Black Sea coast. The data have been collected at small watersheds Aibga Station.

Keywords: physical properties of the soil, heat balance of the soil, beech tree forest, Black Sea coast of the Caucasus.

УДК 630*
228(23)