

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕМНО-СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ
ПОД НАСАЖДЕНИЯМИ ФЛОКСОВ МЕТЕЛЬЧАТЫХ В УСЛОВИЯХ АЛТАЙСКОГО ПРИОБЬЯFORMATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF DARK-GRAY FOREST SOIL
UNDER PHLOX PANICULATA PLANTATIONS IN THE ALTAI REGION'S OB RIVER AREA

Ключевые слова: темно-серая лесная почва, теплофизические свойства, влажность, теплоемкость, тепло- и температуропроводность.

Флоксы метельчатые являются многолетними цветочными культурами, селекционная работа с которыми ведется в НИИ садоводства Сибири имени М.А. Лисавенко со дня его основания. Первостепенным достоинством флоксов является их пышное и длительное цветение. Тем не менее изучение теплофизических свойств и микроклимата почвы под насаждениями цветочных культур на сортоиспытательных участках практически отсутствует. В этой связи нами была обозначена цель и организованы исследования теплофизических свойств (ТФС) и водно-теплового режима в генетических горизонтах темно-серой лесной почвы под насаждениями флоксов сорта Румянец девушки. Тепловое состояние почвы определяется температурой, теплоемкостью, тепло- и температуропроводностью, а также теплопотоками, возникающими в ее профиле. В то же время эти свойства определяются агрофизическими почвенными показателями, такими как влажность, плотность, дисперсность, температура и содержание органического вещества. При этом максимальное воздействие оказывают гранулометрический состав (консервативная субстанция) и влагосодержание (динамичная компонента влияния). В целом теплофизический профиль темно-серой лесной почвы летом 2023 г. оставался стационарным в течение всего периода наблюдений. Нужно отметить, что в 1-й половине вегетации 2024 г. атмосферные осадки практически отсутствовали, но август и начало осени были дождливыми. В результате почвенные горизонты почвы оказались насыщенными влагой, особенно в подстилающих В и ВСк, в которых степень увлажнения почти в 2 раза превысила наименьшую влагоемкость (НВ). В результате объемная теплоемкость почвы в сентябре по сравнению с абсолютно сухим состоянием возросла в 2,3 раза, а теплопроводность увеличилась в 3,6 раза. Температуропроводность снизилась при этом только на 33%.

Keywords: dark gray forest soil, thermophysical properties, moisture content, thermal capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity.

Phlox paniculata is a perennial flower crop; selective breeding with this flower has been carried out at the Research Institute of Gardening in Siberia named after M.A. Lisavenko since its foundation. The primary advantage of phloxes is their luxuriant and long flowering. Nevertheless, the thermal properties and microclimate of the soil under plantings of flower crops on variety testing sites are understudied. In this regard, we have defined the research goal and organized the studies of the thermophysical properties and water-thermal regime in the genetic horizons of dark gray forest soil under the plantings of the phlox variety Rumyanets Devushki. The thermal state of the soil is determined by its temperature, thermal capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity as well as heat flows arising in its profile. At the same time, these properties are determined by the agrophysical soil indices as moisture content, density, dispersion, temperature and organic matter content. In this case, the maximum impact is exerted by the particle-size composition (conservative substance) and moisture content (dynamic component of influence). In general, the thermophysical profile of the dark gray forest soil in the summer of 2023 remained stationary throughout the observation period. It should be noted that in the first half of the growing season of 2024, there was virtually no precipitation, but August and early autumn were rainy. As a result, the soil horizons were saturated with moisture, especially in the underlying horizons B and BC_k where the degree of moistening was almost twice as high as the lowest moisture capacity. As a result, the volumetric thermal capacity of the soil in September increased 2.3 times compared to the absolutely dry state, and the thermal conductivity increased 3.6 times. Thermal diffusivity decreased by 33% only.

Макарычев Сергей Владимирович, д.б.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Makarychev1949@mail.ru.

Тихонова Татьяна Владимировна, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: fpo@mai.ru.

Makarychev Sergey Vladimirovich, Dr. Bio. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Makarychev1949@mail.ru.

Tikhonova Tatyana Vladimirovna, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: fpo@mail.ru.

Введение

Флоксы метельчатые (*Phlox paniculana* L.) являются многолетними цветочными культурами, селекционная работа с которыми ведется в НИИ садоводства Сибири имени М.А. Лисавенко (НИИСС) со дня его основания. Они представляют собой декоративные травянистые растения от 30 до 100 см высотой [1, 2]. Первостепенным достоинством флоксов является их пышное и длительное цветение. Имеются сорта, цветение которых начинается в конце мая и заканчивается осенью [3, 4]. Отдельные цветочки растения собраны в плотные соцветия, обладающие приятным ароматом и имеющие самую разную окраску. По мнению Л.А. Клементьевой [4], задачей селекционеров является получение сортов, приспособленных к негативным условиям внешней среды. Тем не менее изучение тепловых свойств и микроклимата почвы на сортоиспытательных участках практически отсутствует. В этой связи по личной инициативе и при одобрении руководства института нами была обозначена **цель** и организованы исследования теплофизических свойств (ТФС) и водно-теплового режима в генетических горизонтах темно-серой лесной почвы под насаждениями флоксов сорта Румянец девушки.

Объекты и методы

Объектом исследований служила темно-серая лесная агропочва, более 80 лет находящаяся под антропогенным воздействием в агроценозе цветочных культур. Экспериментальное изучение теплофизических свойств почвы проводилось с помощью лабораторной установки, созданной на основе импульсного метода плоского нагревателя [5]. Температура измерялась в естественных условиях электротермометрами [6-8] в сезонном цикле через каждые три часа, а влажность термостатновесовым способом [9]. В работе также была использована методика С.В. Макарычева [10], основанная на ранее полученной базе данных для почвенного покрова Алтайского края.

Экспериментальный участок расположен в нагорной части г. Барнаула, приуроченной к лесостепной зоне Алтайского края. Он защищен от ветра и характеризуется высокой инсоляцией. Кульптура флоксов высажена рядами с расстоянием 30 см и 80-сантиметровыми меж-

дурядьями. Капельное орошение проводилось бессистемно.

Результаты исследований

Темно-серая лесная почва в агроценозе флоксов метельчатых относится к легкосуглинистой разновидности, которая содержит не более 26% глинистых частиц. Почвообразующая порода супесчаная. Агрофизические исследования показали, что почвенный профиль уплотнен с самой поверхности. Плотность сложения пахотного горизонта соответствует 1,22 г/см³, иллювиального – 1,44, подстилающих слоев – 1,56 г/см³. Содержание гумуса снижается вниз по профилю с 5,0 до 0,3%. Иллювиальный горизонт и почвообразующая порода в большой степени представлены мелким песком.

Результаты теплофизических исследований содержатся в таблицах 1-4. Данные таблицы 1 получены на образцах ненарушенного сложения, взятых из разреза темно-серой лесной почвы, изученных в лаборатории теплофизики Алтайского ГАУ с помощью импульсного метода с применением плоского источника тепла по генетическим горизонтам [10].

Как показывают данные таблицы 1, теплофизические коэффициенты (ТФК), такие как теплоемкость, а также тепло- и температуропроводность вниз по профилю почвы изменяются. Так, объемная теплоемкость возрастает с увеличением плотности сложения почвы глубиной с 1,48 до $1,89 \times 10^6$ Дж/(м³·К), или на 28%. В то же время температуропроводность в подстилающих горизонтах снижается, поскольку при уплотнении количество воздухоносных пор, хорошо проводящих температуру, падает. В свою очередь теплопроводность, будучи равная произведению вышеуказанных показателей, имеет тенденцию к росту, но в малых пределах.

Учитывая, что полное обезвоживание почвенного профиля в естественных условиях невозможно, мы рассчитали величины ТФК в соответствии с реальными агрофизическими характеристиками генетических горизонтов почвенного профиля в разные годы. Так, в таблице 2 приведены значения теплофизических свойств, соответствующих началу экспериментальных исследований, проведенных 26 октября 2022 г.

Таблица 1

Объемная теплоемкость (C_0), температуропроводность (a) и теплопроводность (λ) генетических горизонтов почвы в абсолютно-сухом состоянии

Теплофизические характеристики	Горизонт, глубина, см				
	Ап, 0-20	А, 20-33	АВ, 33-40	В, 40-62	ВСк, 62-80
$C_0, 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	1,48	1,66	1,59	1,91	2,12
$a, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	0,32	0,3	0,32	0,25	0,23
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,42	0,44	0,42	0,48	0,49

Таблица 2

Влажность (U), объемная теплоемкость (Cp), температуропроводность (a) и теплопроводность (λ) чернозёма выщелоченного под цветочными культурами (2022 г.)

Горизонт \ ТФС	$U, \%$	$Cp, 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$a, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
Флоксы (26.10.2022 г.)				
Ап+А, 0-33 см	19,33	2,73	0,58	1,54
АВ, 33-40 см	19,95	2,76	0,61	1,56
В, 40-62 см	12,55	2,40	0,64	1,53
ВСк, 62-80 см	15,26	2,53	0,64	1,59

В полевых условиях особенности теплофизических свойств почвы резко изменяются под воздействием увлажнения ее генетических горизонтов. Его рост напрямую увеличивает все составляющие теплового состояния почвенного профиля. Поскольку влажность верхних слоев повысилась до 20% от массы сухой почвы, объемная теплоемкость достигла $2,76 \times 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, или на 72,5%. В подстилающих слоях почвы эти изменения слабее в силу меньшего увлажнения (табл. 2). В то же время температуропроводность и теплопроводность оказались выше в два раза по сравнению с обезвоженными образцами почвы.

Сезонные наблюдения 2023 г. позволили получить более подробную картину формирования теплофизических коэффициентов (табл. 3).

Известно, что основная роль в формировании теплофизического состояния почвы принадлежит наиболее динамичному агрофизическому показателю, такому как влагосодержание [10]. Проведенные измерения влажности в полевых условиях показали, что относительная влажность горизонтов почвы в течение вегета-

ции менялась в пределах от 11 до 16% от массы почвы. Так, в первой половине вегетации в почве содержались довольно малые запасы влаги, не превышающие ВРК (влажность разрыва капилляров), при которых прекращается рост теплопроводности. При этом в мае и июле несколько большее количество воды наблюдалось в подстилающих почвенных горизонтах В и ВСк. Но в начале октября в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте сохранилось только 9,4% почвенной влаги. В соответствии с этим изменения теплофизических показателей варьировали в малом диапазоне. Так, максимум объемной теплоемкости В и ВСк в мае-июне составлял около $2,61 \times 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Ее же минимум пришелся на начало октября и оказался равным $2,23 \times 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Таким образом, разница между этими значениями составила только 14,5%. Температуропроводность при этом оставалась неизменной, но весьма высокой ($0,64 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Теплопроводность испытывала во времени колебания, аналогичные изменениям теплоемкости. Ее наименьшая величина была зафиксирована в гумусовом горизонте 5 октября и оказалась равной $1,46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а

наибольшая – 17 мая и 29 июня в более влажной почве и достигала 1,61 Вт/(м·К). Тем не менее в целом теплофизический профиль темно-серой лесной почвы оставался стационарным в течение всего периода наблюдений.

Лето 2024 г. оказалось более дождливым, особенно в августе, поэтому теплофизическое состояние претерпело более значительные колебания по сравнению с 2024 г. (табл. 4).

Таблица 3

Влажность (U), объёмная теплоёмкость (Cp), температуропроводность (a) и теплопроводность (λ) темно-серой лесной почвы в агроценозе флоксов метельчатых

Горизонт \ ТФС	U, %	Cp, 10 ⁶ Дж/(м ³ ·К)	a, 10 ⁻⁶ м ² /с	λ, Вт/(м·К)
17.05.2023 г.				
Ап+А, 0-33 см	13,38	2,43	0,64	1,55
AB, 33-40 см	13,64	2,45	0,64	1,56
B, 40-62 см	16,88	2,61	0,63	1,61
BC _к , 62-80 см	13,64	2,45	0,64	1,56
29.06.2023 г.				
Ап+А, 0-33 см	11,32	2,33	0,64	1,51
AB, 33-40 см	11,62	2,35	0,64	1,52
B, 40-62 см	16,55	2,59	0,63	1,61
BC _к , 62-80 см	16,03	2,57	0,63	1,60
09.08.2023 г.				
Ап+А, 0-33 см	12,97	2,41	0,64	1,55
AB, 33-40 см	14,48	2,49	0,64	1,57
B, 40-62 см	11,09	2,32	0,64	1,51
BC _к , 62-80 см	11,06	2,32	0,64	1,50
05.10.2023 г.				
Ап+А, 0-33 см	9,38	2,23	0,64	1,46
AB, 33-40 см	11,03	2,32	0,64	1,50
B, 40-62 см	13,44	2,44	0,64	1,55
BC _к , 62-80 см	14,39	2,48	0,64	1,57

Таблица 4

Влажность (U), объёмная теплоёмкость (Cp), температуропроводность (a) и теплопроводность (λ) чернозёма выщелоченного под цветочными культурами (2024 г.)

Горизонт \ ТФС	U, %	Cp, 10 ⁶ Дж/(м ³ ·К)	a, 10 ⁻⁶ м ² /с	λ, Вт/(м·К)
26.06.2024 г.				
Ап+А, 0-33 см	18,13	2,67	0,62	1,63
AB, 33-40 см	16,23	2,58	0,63	1,60
B, 40-62 см	13,71	2,45	0,64	1,56
BC _к , 62-80 см	19,02	2,72	0,61	1,63
12.09.2024 г.				
Ап+А, 0-33 см	9,84	2,26	0,64	1,48
AB, 33-40 см	23,61	2,95	0,57	1,66
B, 40-62 см	27,01	3,12	0,52	1,66
BC _к , 62-80 см	34,52	3,69	0,48	1,68

Нужно отметить, что в первой половине вегетации 2024 г. атмосферные осадки практически отсутствовали, но август и начало осени были дождливыми. В результате профиль темно-серой лесной почвы оказался насыщен влагой, особенно в подстилающих горизонтах В и ВСк, в которых степень увлажнения почти в 2 раза превысила наименьшую влагоемкость (НВ). В результате за счет большого количества почвенной влаги объемная теплоемкость 12 сентября составила $3,69 \times 10^6$ Дж/(м³ К), т.е. по сравнению с абсолютно сухим состоянием она возросла в 2,3 раза. Температуропроводность же снизилась в тех же горизонтах только на 33%. Наибольшие изменения претерпела теплопроводность почвообразующей породы, которая составила 1,68 Вт/(м К), т.е. стала больше в 3,6 раза.

Таким образом, проведенные наблюдения за динамикой теплофизических коэффициентов года убедительно показали, что объемная теплоемкость и теплопроводность прежде всего зависят от величины влагосодержания в генетических горизонтах темно-серой лесной почвы. В результате появляется возможность регулирования количеством тепловой энергии, поступающей в почву посредством ее искусственного увлажнения. В этом случае максимальный эффект в легкосуглинистых почвах имеет место при влажностях, близких к влажности разрыва капиллярных связей, при которой замедляется процесс теплопередачи в почвенном профиле.

Выводы

1. Теплофизические коэффициенты (ТФК), такие как теплоемкость, а также тепло- и температуропроводность вниз по профилю почвы изменяются. Так, объемная теплоемкость в обезвоженном состоянии возрастает на 28% при увеличении плотности сложения почвы с глубиной. В то же время температуропроводность в подстилающих горизонтах становится ниже, поскольку при уплотнении количество воздухоносных пор, хорошо проводящих температуру, падает. В свою очередь теплопроводность, будучи равная произведению вышеуказанных показателей, имеет тенденцию к росту, но в малых пределах.

2. Проведенные измерения влажности почвы летом 2023 г. в полевых условиях показали, что она в течение вегетации менялась в преде-

лах от 11 до 16% от массы почвы. В соответствии с этим изменения теплофизических показателей варьировали в малых пределах, поэтому разность между экстремальными значениями объемной теплоемкости составила только 14,5%. Температуропроводность при этом оставалась неизменной, но весьма высокой ($0,64 \times 10^{-6}$ м²/с). Теплопроводность испытывала во времени колебания, аналогичные изменениям теплоемкости. В целом теплофизический профиль темно-серой лесной почвы оставался стационарным в течение всего периода наблюдений.

3. В первой половине вегетации 2024 г. атмосферные осадки практически отсутствовали, но август и начало осени были дождливыми, поэтому профиль темно-серой лесной почвы оказался насыщен влагой, особенно в подстилающих горизонтах В и ВСк, в которых степень увлажнения почти в два раза превысила наименьшую влагоемкость. В результате за счет большого количества почвенной влаги теплоемкость 12 сентября составила $3,69 \times 10^6$ Дж/(м³·К). Температуропроводность же снизилась в тех же горизонтах на 33%. Наибольшие изменения претерпела теплопроводность почвообразующей породы, которая составила 1,68 Вт/(м·К), т.е. стала больше в 3,6 раза.

Библиографический список

1. Долганова, З. В. Биология и интродукция цветочно-декоративных корневищных многолетников в Западной Сибири / З. В. Долганова; РАСХН. Сиб. отд. НИИСС им. М. А. Лисавенко. – Новосибирск, 2002. – 232 с. – Текст: непосредственный.
2. Долганова, З. В. Изменчивость ритмов роста и развития видов и сортов рода *Phlox* L. в условиях лесостепи Алтайского Приобья / З. В. Долганова, Л. А. Клементьева. – Текст: непосредственный // Материалы Всероссийского научно-практического совещания по флоксам «*Phlox*-2014». – Москва: Изд-во БС МГУ им. Ломоносова, 2014. – С. 54-59.
3. Клементьева, Л. А. Первый сорт флокса метельчатого на Алтае // Индустриальное садоводство Сибири. Сорта, технологии, практика: сборник статей / Л. А. Клементьева; ФГБНУ ФАНЦА. – Барнаул, 2019. – С. 81-89. – Текст: непосредственный.

4. Клементьева, Л. А. Селекционный фонд флокса метельчатого НИИСС имени М. А. Лисавенко / Л. А. Клементьева. – Текст: непосредственный // Инновационные направления развития сибирского садоводства: наследие академиков М. А. Лисавенко, И. П. Калининой: сборник статей / ФГБНУ ФАНЦА. – Барнаул: Концерн, 2018. – С. 114-122.

5. Болотов, А. Г. Автоматизированная система для исследования теплофизических характеристик почв / А. Г. Болотов, С. В. Макарычев, А. А. Левин. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2002. – № 3 (7). – С. 20-22.

6. Болотов, А. Г. Измерение температуры почвы с помощью технологии 1-Wire / А. Г. Болотов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 11 (97). – С. 29-30.

7. Особенности термического режима дерново-подзолистой почвы в агроценозе цветочных культур на территории дендрария города Барнаула / С. В. Макарычев, А. А. Томаровский, Л. А. Клементьева, Т. В. Тихонова. – Текст: непосредственный // Владимирский земледелец. – 2024. – № 3 (108). – С. 14-19.

8. Определение профильного распределения температуры почвы на основании температуры ее поверхности / А. Г. Болотов, Е. В. Шеин, М. А. Мазиров, А. И. Мартынов. – Текст: непосредственный // Земледелие. – 2018. – № 7. – С. 26-29.

9. Вадюнина, А. Ф. Методы исследования физических свойств почвы / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. – Москва: Агропромиздат, 1986. – 416 с. – Текст: непосредственный.

10. Макарычев, С. В. Теплофизические свойства почв Юго-Западной Сибири: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Макарычев Сергей Владимирович. – Москва, 1993. – 36 с. – Текст: непосредственный.

2. Dolganova Z. V., Klementeva L. A. Izmenchivost ritmov rosta i razvitiia vidov i sortov roda Phlox L. v usloviiakh lesostepi Altaiskogo Priobia / Z.V. Dolganova, L.A. Klementeva // Materialy Vserossiiskogo nauchno-praktich. soveshch. po floksam «Phlox-2014». – Moskva: Izd-vo BS MGU im. Lomonosova, 2014. – S. 54-59.

3. Klementeva L.A. Pervyi sort floksa metelchatogo na Altai // Industrialnoe sadovodstvo Sibiri. Sorta, tekhnologii, praktika: sbornik statei / FGBNU FANTsA. – Barnaul, 2019. – S. 81-89.

4. Klementeva L.A. Seleksionnyi fond floksa metelchatogo NIIS imeni M.A. Lisavenko // Innovatsionnye napravleniiia razvitiia sibirskogo sadovodstva: nasledie akademikov M.A. Lisavenko, I.P. Kalininoi: sb. st. / FGBNU FANTsA. – Barnaul: Kontsern, 2018. – S. 114-122.

5. Bolotov, A.G. Avtomatizirovannaia sistema dlja issledovaniia teplofizicheskikh kharakteristik pochv / A.G. Bolotov, S.V. Makarychev, A.A. Levin // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2002. – No. 3 (7). – S. 20-22.

6. Bolotov, A. G. Izmerenie temperatury pochvy s pomoshchiu tekhnologii 1-Wire / A. G. Bolotov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2012. – No. 11 (97). – S. 29-30.

7. Makarychev S.V. Osobennosti termicheskogo rezhima dernovo-podzolistoи pochvy v agrotsenoze tsvetochnykh kultur na territorii dendriiia goroda Barnaula / S.V. Makarychev, A.A. Tomarovskii, L.A. Klementeva, T.V. Tikhonova // Vladimirskii zemledelets. – 2024. – No. 3 (108). – S. 14-19.

8. Bolotov A.G. Opredelenie profilnogo raspredelenii temperatury pochvy na osnovanii temperatury ee poverkhnosti / A.G. Bolotov, E.V. Shein, M.A. Mazirov, A.I. Martynov // Zemledelie. – 2018. – No. 7. – S. 26-29.

9. Vadiunina A.F. Metody issledovaniia fizičeskikh svoistv pochvy / A.F. Vadiunina, Z.A. Korchagina. – Moskva: Agropromizdat, 1986. – 416 s.

10. Makarychev, S. V. Teplofizicheskie svoistva pochv Iugo-Zapadnoi Sibiri: spetsialnost 06.01.03 "Agrofizika": avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora biologicheskikh nauk / Makarychev Sergei Vladimirovich. – Moskva, 1993. – 36 s.

References

1. Dolganova Z.V. Biologija i introduktsiia tsvetochno-dekorativnykh kornevishchnykh mnogoletnikov v Zapadnoi Sibiri / RASKhN. Sib. otd. NIIS im. M.A. Lisavenko. Novosibirsk, 2002. 232 s.

