

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-43-75



### **Ссылки для цитирования:**

Доброхотов А.В., Козырева Л.В. Влияния внесения биоугля на теплофизические свойства дерново-подзолистой почвы и составляющие энергетического баланса яровой пшеницы в Ленинградской области при различных условиях почвенного увлажнения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 43-75. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-43-75

### **Cite this article as:**

Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V., Influence of the biochar application on the thermal properties of soddy-podzolic soil and on the energy balance fluxes of spring wheat in the Leningrad region under various soil moisture conditions, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 43-75, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-43-75

### **Благодарность:**

Авторы выражают благодарность Чикишеву Дмитрию Владимировичу и Балашову Евгению Владимировичу за содействие в проведении исследований, Моисееву Кириллу Геннадьевичу за предоставление материалов исследований гранулометрического состава почвы на сельскохозяйственных полях Меньковской опытной станции Агрофизического научно-исследовательского института.

### **Acknowledgments:**

The authors would like to thank Dmitry Vladimirovich Chikishev and Evgeny Vladimirovich Balashov for their assistance in conducting the research, Kirill Gennadyevich Moiseev for providing the materials on particle size distribution of soil on agricultural fields of Menkovo experimental station of Agrophysical Research Institute.

## **Влияния внесения биоугля на теплофизические свойства дерново-подзолистой почвы и составляющие энергетического баланса яровой**

## пшеницы в Ленинградской области при различных условиях почвенного увлажнения<sup>1</sup>

© 2023 г. А. В. Доброхотов<sup>1,2\*</sup>, Л. В. Козырева<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт, Россия,  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., д. 14,

\* <https://orcid.org/0000-0002-9368-6229>, e-mail: [dobralexey@gmail.com](mailto:dobralexey@gmail.com),

\*\* <https://orcid.org/0000-0001-7990-8211>, e-mail: [4ludak@gmail.com](mailto:4ludak@gmail.com).

<sup>2</sup>ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,  
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2.

Поступила в редакцию 16.01.2023, после доработки 29.03.2023,  
принята к публикации 27.06.2023

**Резюме:** В статье приведены результаты полевого эксперимента по оценке влияния предпосевного внесения биоугля на теплофизические свойства пахотного горизонта дерново-подзолистой супесчаной почвы, составляющие энергетического баланса, температуру подстилающей поверхности и температуру листьев яровой пшеницы сорта “Дарья” при различных условиях почвенного увлажнения в 2022 г. Эксперимент проводился на территории Меньковской опытной станции Агрофизического научно-исследовательского института, расположенной в Гатчинском районе Ленинградской области. Эксперимент включал опытный участок с внесением биоугля в дозе 21.9 т га<sup>-1</sup> и контрольный участок. Условия почвенного увлажнения и влагообеспеченность пшеницы характеризовались объемной влажностью почвы и суммарным испарением. По результатам полевых экспериментов было обнаружено значимое влияние ( $p < 0.05$ ) внесения биоугля на теплофизические свойства почвы, однако в условиях различного увлажнения влияние было разнонаправленное. При влажности почвы в абсолютно сухом состоянии внесение биоугля уменьшило на 29.7% теплопроводность, уменьшило на 18.5% объемную теплоемкость, уменьшило на 13.7% температуропроводность, уменьшило на 24.3% тепловую инерцию. При значениях влажности почвы, соответствующей наименьшей влагоемкости, внесение биоугля увеличило на 9.4% теплопроводность, уменьшило на 2.6% объемную теплоемкость, увеличило на 12.3% температуропроводность, увеличило на 3.2% тепловую инерцию.

---

<sup>1</sup> Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых “Почвоведение: Горизонты будущего. 2022”, посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Внесение биоугля значимо ( $p < 0.05$ ) за счет увеличения температуры подстилающей поверхности (на 6.4%) увеличило турбулентный поток тепла на 35.5%. Вследствие снижения испарения с поверхности почвы внесение биоугля уменьшило на 17.0% скрытый поток тепла и на 13.9% суммарное испарение. Температура листьев характеризует транспирацию растительности, которая может повышаться при внесении биоугля на легких почвах из-за увеличения влагоемкости. В нашем эксперименте внесение биоугля не оказало значимых изменений на температуру листьев растений. Результаты эксперимента подтверждаются многочисленными выводами как зарубежных, так и отечественных исследователей.

**Ключевые слова:** биоуголь, дерново-подзолистая супесчаная почва, составляющие энергетического баланса, теплофизические свойства почвы, температура подстилающей поверхности, температура листьев, суммарное испарение.

## **Influence of the biochar application on the thermal properties of soddy-podzolic soil and on the energy balance fluxes of spring wheat in the Leningrad region under various soil moisture conditions<sup>1</sup>**

© 2023 A.V. Dobrokhotov<sup>1,2\*</sup>, L.V. Kozyreva<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Agrophysical Research Institute,

14 Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg 195220, Russian Federation,  
<sup>\*</sup><https://orcid.org/0000-0002-9368-6229>, e-mail: [dobralexey@gmail.com](mailto:dobralexey@gmail.com),  
<sup>\*\*</sup><https://orcid.org/0000-0001-7990-8211>, e-mail: [4ludak@gmail.com](mailto:4ludak@gmail.com).

<sup>2</sup>Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,  
7 Bld. 2 Pzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation.

Received 16.01.2023, Revised 29.03.2023, Accepted 27.06.2023

**Abstract:** The article presents the results of a field experiment to assess the effect of pre-sowing application of the biochar on the thermal properties of the arable horizon of soddy-podzolic sandy loam soil, on the energy balance components, on the crop surface temperature and on the leaves temperature of spring wheat (variety “Daria”) under various conditions of soil moisture in

---

<sup>1</sup> Proceedings of the VI Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95<sup>th</sup> anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

2022. The experiment took place at the Menkovo Experimental Station of the Agrophysical Research Institute, located in the Gatchinsky District of the Leningrad Region. The experiment included the plot with the biochar application at the dose of 21.9 t ha<sup>-1</sup> and the control plot. The soil thermal properties were measured by the heat pulse method. The components of the energy balance were determined using agrometeorological measurements, radiation balance measurements, crop surface temperature, and phenological measurements. The crop surface temperature was measured by a non-contact method using pyrometers. The soil moisture conditions and available water for wheat were characterized by volumetric soil moisture and evapotranspiration. The volumetric soil moisture was measured using a capacitive soil moisture sensor. The evapotranspiration was determined using the residual term of the energy balance equation through the latent heat flux. According to the results of field experiments, a significant effect ( $p < 0.05$ ) of the biochar application on the soil thermal properties was found, however, under different moisture conditions, the effect was multidirectional. At zero soil moisture, the biochar application reduced thermal conductivity by 29.7%, reduced volumetric heat capacity by 18.5%, reduced diffusivity by 13.7%, and reduced thermal inertia by 24.3%. Under the conditions of field capacity, the biochar application increased thermal conductivity by 9.4%, reduced volumetric heat capacity by 2.6%, increased diffusivity by 12.3%, and increased thermal inertia by 3.2%. The biochar application significantly ( $p < 0.05$ ) increased the turbulent heat flux – by 35.5%, which is due to an increase in the crop surface temperature (by 6.4%). Resulting from the decrease in soil evaporation, the biochar application reduced the latent heat flux by 17.0%, and the evapotranspiration by 13.9%. Leaf temperature is related to transpiration. Transpiration can increase when biochar is applied on light-textured soils due to an increase in soil water capacity. The biochar application did not result in significant changes of leaf temperature. The study results are confirmed by numerous articles of both foreign and Russian researchers.

**Keywords:** biochar, soddy-podzolic sandy loam soil, soil thermal properties, energy balance components, crop surface temperature, leaf temperature, evapotranspiration.

## ВВЕДЕНИЕ

Биоуголь является продуктом пиролиза биомассы в бескислородной среде. Он имеет пористую структуру и содержит множество различных функциональных групп ([Lehmann, Joseph, 2015](#)). Биоуголь может содержать некоторое количество гумино-

вых веществ ([Lin et al., 2012](#)). Кроме того, его молекулярная структура имеет высокую степень химической и микробиологической стабильности ([Cheng et al., 2008](#)). Физические и химические свойства биоугля сильно зависят от температуры и продолжительности пиролиза, типа исходного сырья ([Joseph et al., 2010](#); [Bruun et al., 2011](#)). В качестве исходного материала для производства биоугля используется широкий спектр сырья, включая древесную щепу, органические отходы, растительные остатки и птичий помет ([Sohi et al., 2010](#)). Элементный состав биоугля обычно включает углерод, азот, водород и вспомогательные питательные элементы, такие как К, Са, Na и Mg ([Zhang et al., 2015](#)). Биоуголь имеет большую удельную площадь поверхности и содержит ряд полярных и неполярных молекул, обладающих сильным сродством к неорганическим ионам, например, к ионам тяжелых металлов, фосфатам и нитратам ([Schmidt et al., 2015](#); [Kammann et al., 2015](#)). Внесение биоугля может улучшить структуру почвы, увеличить пористость, уменьшить плотность и увеличить влагоемкость почвы ([Baiaimonte et al., 2015](#)). Биоуголь может увеличить электропроводность почвы ([Oguntunde et al., 2004](#)) и емкость катионного обмена ([Laird et al., 2010](#)), а также снизить кислотность почвы ([Oguntunde et al., 2004](#)). Кроме того, внесение биоугля способствует увеличению микробной биомассы ([Liang et al., 2010](#)), состава бактериального сообщества почвы ([Grossman et al., 2010](#)), базального дыхания ([Steiner et al., 2008](#)). Секвестрация углерода за счет применения биоугля приводит к повышению плодородия почв с низким содержанием питательных веществ ([Jiang et al., 2012](#); [Liu et al., 2012](#)). Существуют различные механизмы повышения доступности питательных веществ для растений в агроэкосистемах: 1) минерализация лабильной фракции биоугля, которая содержит органически связанные питательные вещества ([Sohi et al., 2010](#); [Lehmann et al., 2012](#)); 2) снижение выщелачивания питательных веществ благодаря физико-химическим свойствам биоугля ([Liang et al., 2006](#)); 3) снижение потерь азота при денитрификации ([Cayuela et al., 2013](#)); 4) удержание азота, фосфора и серы, связанное с усилением биологической активности почвы или изменением бактериального сообщества ([Pietikäinen et al., 2000](#)). Согласно результатам некоторых полевых экспериментов применение био-

угля улучшило качество почвы, увеличило урожайность и способствовало росту растений ([Lehmann et al., 2006](#); [Major et al., 2010](#); [Zhang et al., 2010](#); [Uzoma et al., 2011](#)). Однако в работе (Asai et al., 2009) приводятся данные о снижении урожайности при применении биоугля. Снижение урожайности может быть связано с высоким содержанием летучих, а также токсичных и вредных веществ в биоугле, которые способствуют снижению поглощения питательных веществ, и, как следствие, подавляют рост растений. Таким образом, повышение урожайности может зависеть от свойств биоугля и свойств почвы.

Теплофизические свойства почвы (теплопроводность, объемная теплоемкость и температуропроводность) влияют на энергетический баланс подстилающей поверхности, аккумуляцию и передачу тепла в почве. Внесение биоугля может снижать теплопроводность и температуропроводность почвы ([Zhang et al., 2013](#); [Usoiewicz et al., 2016](#); [Zhao et al., 2016](#)) и, как следствие, снижать количество тепла, передаваемого через почву (теплопроводность). Терморегулирующий потенциал биоугля выглядит многообещающим, так как внесение биоугля может иметь стратегическое значение для управления климатическими рисками, такими как засухи и волны тепла, которые в последнее время остро ощущаются в Северо-Западном регионе России. Теплофизические свойства почвы в значительной степени коррелируют с другими свойствами почвы, такими как плотность и влажность почвы, содержание органического вещества, концентрация растворенных веществ. Например, теплопроводность почвы может увеличиваться с увеличением плотности и влажности почвы и уменьшаться с увеличением органического вещества почвы и концентрации солей ([Abu-Hamdeh, Reeder, 2000](#); [Zhao et al., 2016](#)). Снижение плотности при применении биоугля может снизить теплопроводность ([Zhang et al., 2013](#)), тогда как увеличение влагоемкости почвы при применении биоугля может увеличить теплопроводность ([Usoiewicz et al., 2016](#)).

В настоящей работе приведены результаты полевого исследования влияния внесения биоугля, произведенного из отходов деревообрабатывающей промышленности методом медленного пиролиза, на теплофизические свойства пахотного горизонта дер-

ново-подзолистой супесчаной почвы при различных условиях увлажнения и влагообеспеченности посевов яровой пшеницы в Ленинградской области и на составляющие энергетического баланса. Данная работа является актуальной, так как влияние внесения биоугля на теплофизические свойства почвы изучено меньше, чем влияние биоугля на физико-химические свойства и микробиологические показатели. Изменение теплофизических свойств почвы при внесении биоугля может быть различно для почв, отличающихся гранулометрическим составом. Исследования влияния биоугля на теплофизические свойства различных типов почв при разном уровне увлажнения являются важными для задач моделирования роста и развития растений при применении биоугля ([Archontoulis et al., 2016](#)).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые эксперименты проводились во время вегетационного периода 2022 г. на Меньковской опытной станции Агрофизического научно-исследовательского института (Гатчинский район Ленинградской области). При проведении экспериментов изучалось влияние внесения биоугля на составляющие энергетического баланса при различных условиях почвенного увлажнения. Возделываемая сельскохозяйственная культура на опытных участках – яровая мягкая пшеница сорта “Дарья” (*Triticum aestivum* L.). Эксперимент включал опытный участок с внесением биоугля в дозе 21.9 т га<sup>-1</sup> в пахотный горизонт почвы и контрольный участок. Биоуголь был изготовлен из отходов деревообрабатывающей промышленности методом медленного пиролиза при температуре 600 °С. Биоуголь внесли на поверхность участка и заделали в почву 05.05.2022 г. перед посевом. Посев был произведен 07.05.2022 г. Площадь опытных участков составляла 16 м<sup>2</sup>. Координаты опытного участка с внесением биоугля – 59°25'28.6" с. ш., 30°02'40.3" в. д.; контрольного участка – 59°25'28.6" с. ш., 30°02'39.6" в. д. Перед посевом в почву дополнительно внесли азофоску (NPK) марки 15 : 15 : 15 в количестве 50 кг д. в. по каждому элементу. Полевые измерения проводились с 11 до 16 часов по местному времени в следующие даты: 19.05.2022, 31.05.2022, 09.06.2022, 23.06.2022, 07.07.2022, 21.07.2022, 04.08.2022.

Для анализа метеорологической информации за весь вегетационный период яровой пшеницы были использованы срочные данные близлежащей стандартной метеорологической станции “Белогорка” (WMO ID = 26069). Почва на опытных участках – супесчаная дерново-подзолистая. Гранулометрический состав пахотного горизонта почвы на опытных участках ([Моисеев и др., 2014](#)): 10.08% – физическая глина; 18.80% – пыль; 70.12% – песок; 1.02% – гравий.

Определялись следующие теплофизические свойства почвы: теплопроводность ( $K$ , Вт м<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>), объемная теплоемкость ( $C$ , МДж м<sup>-3</sup> К<sup>-1</sup>), температуропроводность ( $D$ , мм<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>). Теплофизические свойства почвы измеряли методом линейного импульсного источника теплоты ([He et al., 2018](#); [Brunetti et al., 2022](#)) с помощью сенсора SH-3 прибора TEMPOS. Измерения теплофизических свойств проводились в полевых условиях каждые 15 минут. Период измерений был выбран исходя из времени наступления термодинамического равновесия между сенсором и почвой после изменения расположения сенсора, а также времени измерения прибора. Для опытных участков было рассчитано еще одно комплексное теплофизическое свойство, характеризующее водный и тепловой режим верхнего слоя почвы, – тепловая инерция (ТИ, Дж м<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup> с<sup>-0.5</sup>), или теплоусвояемость ([De Vries, 1963](#)). Тепловая инерция представляет собой сопротивление почвы изменению температуры ее верхнего слоя (несколько сантиметров). Тепловая инерция широко используется в моделях определения влажности верхнего слоя почвы ([Lu et al., 2009](#)):

$$ТИ = \sqrt{K \cdot C}.$$

Уравнение энергетического баланса подстилающей поверхности формулируется как (Choudhury et al., 1987):

$$LE = R_n - H - G,$$

где  $LE$  – скрытый поток тепла (Вт м<sup>-2</sup>),  $R_n$  – радиационный баланс (Вт м<sup>-2</sup>),  $H$  – турбулентный поток тепла (Вт м<sup>-2</sup>),  $G$  – поток тепла в почву (Вт м<sup>-2</sup>).

Суммарное испарение – сумма испарения почвы и транспирации. Суммарное испарение является важнейшим показателем энерго-массообмена в системе “почва–растение–приземный слой воздуха”. Суммарное испарение ( $E_T$ , мм час<sup>-1</sup>) определялось через скрытый поток тепла ( $LE$ , Вт м<sup>-2</sup>). Скрытый поток тепла оценивался как остаточный член в уравнении энергетического баланса с помощью специальных агрометеорологических измерений прибором АМПАК (Efimov et al., 2018).

Радиационный баланс над участком с внесением биоугля измерялся с помощью балансомера (Foken et al., 2021), радиационный баланс для участка без внесения биоугля рассчитывался через изменение уходящего длинноволнового излучения в уравнении радиационного баланса (Brutsaert, 1975).

Турбулентный поток тепла определялся аэродинамическим методом (Liu et al., 2007):

$$H = \frac{\rho_a C_p (T_s - T_a)}{r_{ah}},$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха (кг м<sup>-3</sup>);  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении (~ 1013 Дж кг<sup>-1</sup> К<sup>-1</sup>) (Allen, 1998);  $T_a$  – температура воздуха на высоте 2 м (°C);  $T_s$  – температура подстилающей поверхности (°C);  $r_{ah}$  – аэродинамическое сопротивление (с м<sup>-1</sup>).

Поток тепла в почву оценивался по данным измерений радиационного баланса и проективному покрытию (Su, 2002). Проективное покрытие определялось с помощью фотографий растительности (Bennett et al., 2000). На фотографиях выделялись пиксели, соответствующие растительности, через фильтр преобладания зеленого цвета в матрице RGB. Проективное покрытие рассчитывалось как площадь растительности по отношению к общей площади поверхности:

$$G = R_n \cdot [\Gamma_c + (1 - f_c) \cdot (\Gamma_s - \Gamma_c)],$$

где  $\Gamma_c$  – коэффициент для полностью сомкнутого растительного покрова (= 0.05);  $\Gamma_s$  – коэффициент для оголенной почвы (= 0.315);  $f_c$  – проективное покрытие (-).

Температура подстилающей поверхности является интегральной величиной температуры излучения почвы и листьев растений. Интегральную температуру подстилающей поверхности на опытных участках измеряли бесконтактным методом с помощью пирометров Optris CT LT ([Khanal et al., 2017](#)). Измерения температуры подстилающей поверхности проводились с интервалом 90 секунд. Различие температуры подстилающей поверхности и температуры воздуха характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью Земли и атмосферой. При этом температура листьев растений с учетом состояния атмосферы характеризует водный стресс растений ([Jones, Leinonen, 2003](#)) и интенсивность транспирации ([Zhao et al., 2022](#)). Для определения температуры листьев была проведена съемка тепловизионной камерой Testo 868 в каждый экспериментальный день.

Объемная влажность почвы определялась на участке с внесением биоугля с помощью емкостного датчика влажности почвы через измерения диэлектрической проницаемости почвы Decagon 10HS ([Visconti et al., 2014](#)). Измерения объемной влажности почвы проводились с интервалом 90 секунд.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа информации о погоде за вегетационный период 2022 г. по стандартной метеорологической станции “Белогорка” (рис. 1) было выделено две экспериментальные даты с контрастными метеорологическими условиями:

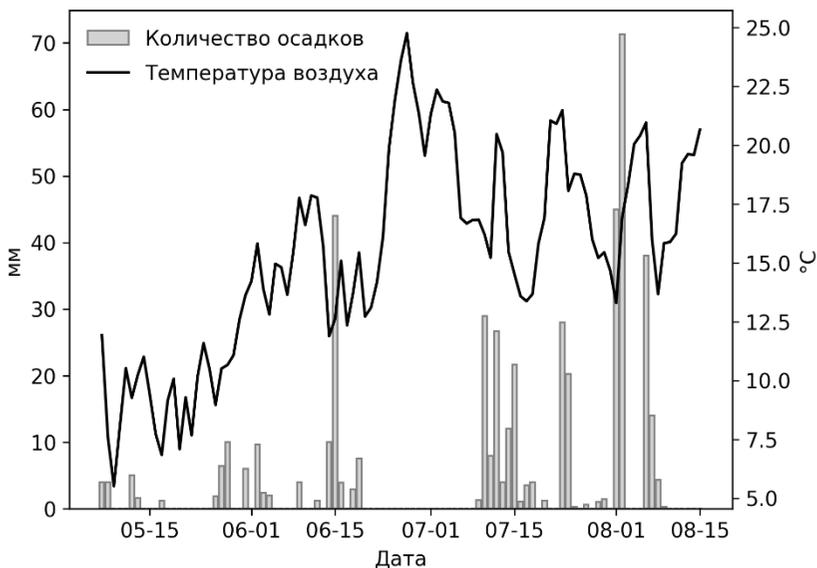
1) 07.07.2022 г. сложились засушливые погодные условия, которые характеризуются предшествующим длительным периодом высоких температур воздуха без выпадения осадков (17 дней без осадков со среднесуточной температурой 19.7 °C);

2) 04.08.2022 г. отмечается как дата высокого увлажнения, так как за двое суток (02.08.2022 г.) выпало максимальное количество осадков (71.3 мм) за весь вегетационный период.

В таблице 1 представлены осредненные значения параметров микроклимата сельскохозяйственного поля, измеренные при-

бором АМПАК: температура воздуха ( $T_a$ ), относительная влажность воздуха (RH), атмосферное давление (P), скорость ветра (u); данные объемной влажности почвы (W), измеренной на глубине 10 см сенсором Decagon 10HS; данные фенологических измерений – высота растений ( $h_c$ ) и оценка проективного покрытия ( $f_c$ ) по результатам обработки фотографий. Высота растений ( $h_c$ ) необходима для оценки параметра шероховатости количества движения и потока тепла, которые используются для определения аэродинамического сопротивления ( $r_{ah}$ ). Данные измерений объемной влажности почвы (W) (табл. 1) согласуются с данными количества осадков, измеренного на метеорологической станции “Белогорка”:

1) 07.07.2022 г. наблюдаются засушливые условия с отсутствием влаги в почве ( $W = 0.01 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$ );



**Рис. 1.** Среднесуточная температура воздуха (°C) и количество осадков (мм) по данным метеорологической станции “Белогорка”.

**Fig. 1.** Average daily air temperature (°C) and precipitation (mm). Data from the meteorological station “Belogorka”.

2) 04.08.2022 г. наблюдается максимальное за даты проведения экспериментов значение влажности почвы ( $W = 0.26 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$ ).

После предобработки исходных данных и удаления выбросов была получена 91 точка измерений теплофизических свойств пахотного горизонта почвы (50 точек для участка с внесением биоугля и 41 точка для контрольного участка). В целом в течение одного дня теплофизические свойства на обоих участках практически не изменялись, но в измерениях присутствовали выбросы. Сильные выбросы могли происходить из-за наличия камня или гравия в радиусе измерения сенсора. Затем было проведено осреднение за время проведения каждого эксперимента. Были осреднены значения теплопроводности (K), объемной теплоемкости (C), температуропроводности (D), тепловой инерции (ТИ) для участка с внесением биоугля (табл. 2) и контрольного участка (табл. 3).

**Таблица 1.** Параметры микроклимата сельскохозяйственного поля: температура воздуха ( $T_a$ , °C), относительная влажность воздуха (RH, %), атмосферное давление (P, кПа), скорость ветра ( $u$ ,  $\text{м с}^{-1}$ ); объемная влажность почвы ( $W$ ,  $\text{м}^3 \text{ м}^{-3}$ ); высота растений ( $h_c$ , м); проективное покрытие ( $f_c$ , -) в даты проведения экспериментов

**Table 1.** Microclimate parameters of an agricultural field: air temperature ( $T_a$ , °C), relative air humidity (RH, %), atmospheric pressure (P, kPa), wind speed ( $u$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ); volumetric soil moisture ( $W$ ,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ); crop height ( $h_c$ , m); projective cover ( $f_c$ , -) on the experiment's dates

	<b>19.05.</b>	<b>31.05.</b>	<b>09.06.</b>	<b>23.06.</b>	<b>07.07.</b>	<b>21.07.</b>	<b>04.08.</b>
<b><math>T_a</math></b>	11.7	15.7	19.5	22.2	20.0	24.2	25.3
<b>RH</b>	57	70	64	45	57	60	51
<b>P</b>	101.3	101.1	100.7	101.0	100.6	101.1	101.7
<b>u</b>	2.0	1.7	2.2	1.7	1.6	2.4	1.3
<b>W</b>	0.19	0.25	0.17	0.18	0.01	0.17	0.26
<b><math>h_c</math></b>	-	0.07	0.15	0.30	0.60	0.65	0.65
<b><math>f_c</math></b>	0	0.15	0.3	0.6	0.7	0.75	0.7

**Таблица 2.** Осредненные значения теплофизических свойств пахотного горизонта почвы на опытном участке с внесением биоугля: теплопроводность ( $K$ , Вт  $m^{-1} K^{-1}$ ), объемная теплоемкость ( $C$ , МДж  $m^{-3} K^{-1}$ ), температуропроводность ( $D$ ,  $mm^2 c^{-1}$ ), тепловая инерция (ТИ,  $Dж m^{-2} K^{-1} c^{-0.5}$ )

**Table 2.** Average values of thermal soil properties on the experimental plot with the biochar application: thermal conductivity ( $K$ ,  $W m^{-1} K^{-1}$ ), volumetric heat capacity ( $C$ ,  $MJ m^{-3} K^{-1}$ ), diffusivity ( $D$ ,  $mm^2 s^{-1}$ ), thermal inertia (ТИ,  $J m^{-2} K^{-1} s^{-0.5}$ )

Дата	$K_{\text{биоуголь}}$	$C_{\text{биоуголь}}$	$D_{\text{биоуголь}}$	ТИ <sub>биоуголь</sub>
19.05.2022	0.358	1.072	0.334	619.6
31.05.2022	0.435	1.295	0.336	750.5
09.06.2022	0.245	1.014	0.241	498.2
23.06.2022	0.389	1.189	0.327	679.9
07.07.2022	0.158	0.965	0.164	390.2
21.07.2022	0.505	1.210	0.417	781.6
04.08.2022	1.155	1.840	0.628	1457.8

**Таблица 3.** Осредненные значения теплофизических свойств пахотного горизонта почвы на контрольном участке: теплопроводность ( $K$ , Вт  $m^{-1} K^{-1}$ ), объемная теплоемкость ( $C$ , МДж  $m^{-3} K^{-1}$ ), температуропроводность ( $D$ ,  $mm^2 c^{-1}$ ), тепловая инерция (ТИ,  $Dж m^{-2} K^{-1} c^{-0.5}$ )

**Table 3.** Average values of thermal soil properties on the control site: thermal conductivity ( $K$ ,  $W m^{-1} K^{-1}$ ), volumetric heat capacity ( $C$ ,  $MJ m^{-3} K^{-1}$ ), diffusivity ( $D$ ,  $mm^2 s^{-1}$ ), thermal inertia (ТИ,  $J m^{-2} K^{-1} s^{-0.5}$ )

Дата	$K_{\text{контроль}}$	$C_{\text{контроль}}$	$D_{\text{контроль}}$	ТИ <sub>контроль</sub>
19.05.2022	0.290	1.057	0.274	553.9
31.05.2022	0.493	1.385	0.356	826.3
09.06.2022	0.394	1.288	0.306	712.5
23.06.2022	0.513	1.355	0.379	833.9
07.07.2022	0.225	1.185	0.190	515.8
21.07.2022	0.618	1.643	0.376	1008.0
04.08.2022	1.06	1.889	0.559	1412.1

Минимальные значения всех теплофизических свойств пахотного горизонта почвы приходятся на засушливый период с минимальной влажностью почвы – 07.07.2022 г. Максимальные значения теплофизических свойств почвы приходятся на 04.08.2022 г., когда наблюдалась максимальная влажность почвы.

Статистический анализ значимости различий теплофизических свойств почвы выполнен с помощью непараметрического U критерия Манна–Уитни–Уилкоксона, так как данные не прошли проверку на нормальность распределения по результатам теста Шапиро–Уилка, а также количество наблюдений в каждой выборке невелико ( $n < 30$ ).

Теплопроводность почвы 07.07.2022 г. на 29.7% меньше на участке с внесением биоугля ( $K_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $K_{\text{контроль}}$ ). Объемная теплоемкость почвы 07.07.2022 г. на 18.5% меньше на участке с внесением биоугля ( $C_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $C_{\text{контроль}}$ ). Температуропроводность почвы 07.07.2022 г. на 13.7% меньше на участке с внесением биоугля ( $D_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $D_{\text{контроль}}$ ). Тепловая инерция почвы 07.07.2022 г. на 24.3% меньше на участке с внесением биоугля ( $TI_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $TI_{\text{контроль}}$ ). Различия между средними значениями теплофизических свойств почвы на участке с внесением биоугля и контрольном участке 07.07.2022 г. статистически значимые ( $p\text{-value} < 0.05$ ) согласно тесту Манна–Уитни–Уилкоксона. Снижение всех теплофизических свойств почвы при внесении биоугля происходит из-за того, что значения теплофизических свойств биоугля меньше, чем соответствующие значения минеральной части твердой фазы почвы ([Liu et al., 2018](#)). При этом внесение биоугля может увеличивать влагоемкость почвы ([Basso et al., 2013](#); [Suliman et al., 2017](#)), особенно на легких почвах, вследствие чего значения некоторых теплофизических свойств почвы при внесении биоугля могут быть и выше, чем без внесения биоугля, что подтверждается результатами измерений теплофизических свойств почвы 04.08.2022 г. после выпадения большого количества осадков. Теплопроводность почвы 04.08.2022 г. на 9.4% больше на участке с внесением биоугля ( $K_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $K_{\text{контроль}}$ ). Объемная теплоемкость почвы 04.08.2022 г. на 2.6% меньше на участке с внесени-

ем биоугля ( $C_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $C_{\text{контроль}}$ ). Температуропроводность почвы 07.07.2022 г. на 12.3% больше на участке с внесением биоугля ( $D_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $D_{\text{контроль}}$ ). Тепловая инерция почвы 04.08.2022 г. на 3.2% больше на участке с внесением биоугля ( $TI_{\text{биоуголь}}$ ), чем на контрольном участке ( $TI_{\text{контроль}}$ ). Различия между средними значениями теплофизических свойств почвы на участке с внесением биоугля и контрольном участке 04.08.2022 г. статистически значимые ( $p$ -value < 0.05) согласно тесту Манна–Уитни–Уилкоксона.

Биоуголь, изменяя теплофизические свойства почвы, может влиять на составляющие энергетического баланса и суммарное испарение через уменьшение отраженной радиации ([Genesio, 2012](#)), увеличение собственного излучения Земли ([Genesio, 2012](#)), увеличение температуры подстилающей поверхности ([Feng et al., 2021](#)), а также снижение испарения с поверхности почвы ([Wang et al., 2018](#)). В таблицах 4 и 5 приведены оценки влияния биоугля на составляющие энергетического баланса и суммарное испарение.

**Таблица 4.** Составляющие энергетического баланса (радиационный баланс ( $R_n$ , Вт м<sup>-2</sup>), турбулентный поток тепла ( $H$ , Вт м<sup>-2</sup>), поток тепла в почву ( $G$ , Вт м<sup>-2</sup>), скрытый поток тепла ( $LE$ , Вт м<sup>-2</sup>) и суммарное испарение ( $ET$ , мм час<sup>-1</sup>) на опытном участке с внесением биоугля

**Table 4.** Energy balance components (radiation balance ( $R_n$ , W m<sup>-2</sup>), turbulent heat flux ( $H$ , W m<sup>-2</sup>), soil heat flux ( $G$ , W m<sup>-2</sup>), latent heat flux ( $LE$ , W m<sup>-2</sup>)) and evapotranspiration ( $ET$ , mm h<sup>-1</sup>) on the experimental plot with the biochar application

Дата	$R_n$ биоуголь	$H$ биоуголь	$G$ биоуголь	$LE$ биоуголь	$ET$ биоуголь
19.05.2022	204.8	163.1	64.5	13.7	0.02
31.05.2022	336.3	76.1	92.6	168.1	0.25
09.06.2022	324.6	151.0	76.5	106.8	0.16
23.06.2022	404.3	144.7	63.1	197.0	0.29
07.07.2022	301.13	164.6	39.0	114.8	0.17
21.07.2022	446.0	82.7	51.9	311.5	0.46
04.08.2022	483.7	25.5	62.6	395.6	0.58

Анализ результатов определения составляющих энергетического баланса над участком с внесением биоугля и контрольным участком показал:

1) Радиационный баланс на участке с внесением биоугля ( $R_{п \text{ биоуголь}}$ ), по сравнению с радиационным балансом на контрольном участке ( $R_{п \text{ контроль}}$ ), в среднем уменьшился на 2.5%. Среднее значение для  $R_{п \text{ биоуголь}} = 360.0 \text{ Вт м}^{-2}$ , для  $R_{п \text{ контроль}} = 369.2 \text{ Вт м}^{-2}$ . Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений ( $p\text{-value} > 0.1$ ) свидетельствует об отсутствии достоверных различий средних значений  $R_{п \text{ биоуголь}}$  и  $R_{п \text{ контроль}}$ .

**Таблица 5.** Составляющие энергетического баланса (радиационный баланс ( $R_{п}$ ,  $\text{Вт м}^{-2}$ ), турбулентный поток тепла ( $H$ ,  $\text{Вт м}^{-2}$ ), поток тепла в почву ( $G$ ,  $\text{Вт м}^{-2}$ ), скрытый поток тепла ( $LE$ ,  $\text{Вт м}^{-2}$ ) и суммарное испарение ( $ET$ ,  $\text{мм час}^{-1}$ ) на контрольном участке

**Table 5.** Energy balance components (radiation balance ( $R_{п}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ), turbulent heat flux ( $H$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ), soil heat flux ( $G$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ), latent heat flux ( $LE$ ,  $\text{W m}^{-2}$ )) and evapotranspiration ( $ET$ ,  $\text{mm h}^{-1}$ ) on the control plot

Дата	$R_{п \text{ контроль}}$	$H_{\text{контроль}}$	$G_{\text{контроль}}$	$LE_{\text{контроль}}$	$ET_{\text{контроль}}$
19.05.2022	215.7	125.1	67.9	31.3	0.05
31.05.2022	343.7	53.3	94.6	195.8	0.29
09.06.2022	335.6	106.3	79.0	151.1	0.22
23.06.2022	426.0	81.3	66.5	278.2	0.41
07.07.2022	310.9	135.5	40.3	140.3	0.21
21.07.2022	446.6	80.5	51.9	314.2	0.46
04.08.2022	485.5	21.5	62.9	401.1	0.59

2) Турбулентный поток тепла над участком с биоуглем ( $H_{\text{биоуголь}}$ ), по сравнению с турбулентным потоком тепла над контрольным участком ( $H_{\text{контроль}}$ ), в среднем увеличился на 35.5%. Среднее значение для  $H_{\text{биоуголь}} = 113.5 \text{ Вт м}^{-2}$ , для  $H_{\text{контроль}} = 83.8 \text{ Вт м}^{-2}$ . Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений

( $p$ -value < 0.05) свидетельствует о наличии статистически значимых различий средних значений  $H_{\text{биоуголь}}$  и  $H_{\text{контроль}}$ .

3) Поток тепла в почву на участке с биоуглем ( $G_{\text{биоуголь}}$ ), по сравнению с потоком тепла в почву на контрольном участке ( $G_{\text{контроль}}$ ), в среднем уменьшился на 2.8%. Среднее значение для  $G_{\text{биоуголь}} = 66.1 \text{ Вт м}^{-2}$ , для  $G_{\text{контроль}} = 68.0 \text{ Вт м}^{-2}$ . Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений ( $p$ -value > 0.1) свидетельствует об отсутствии достоверных различий средних значений  $G_{\text{контроль}}$ .

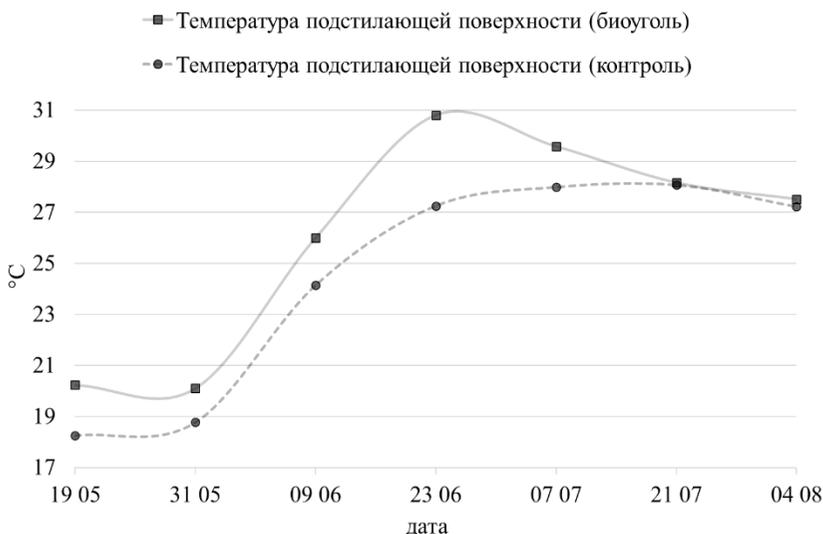
4) Скрытый поток тепла над участком с биоуглем ( $LE_{\text{биоуголь}}$ ), по сравнению со скрытым потоком тепла над контрольным участком ( $LE_{\text{контроль}}$ ), в среднем уменьшился на 17.0%. Среднее значение для  $LE_{\text{биоуголь}} = 180.5 \text{ Вт м}^{-2}$ , для  $LE_{\text{контроль}} = 217.5 \text{ Вт м}^{-2}$ . Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений ( $p$ -value < 0.05) свидетельствует о наличии статистически значимых различий средних значений  $LE_{\text{биоуголь}}$  и  $LE_{\text{контроль}}$ .

5) Суммарное испарение над участком с биоуглем ( $ET_{\text{биоуголь}}$ ), по сравнению с суммарным испарением над контрольным участком ( $ET_{\text{контроль}}$ ), в среднем уменьшилось на 13.9%. Среднее значение для  $ET_{\text{биоуголь}} = 0.28 \text{ мм час}^{-1}$ , для  $ET_{\text{контроль}} = 0.32 \text{ мм час}^{-1}$ . Значение критерия Манна–Уитни–Уилкоксона для оценки различий средних значений ( $p$ -value < 0.05) свидетельствует о наличии статистически значимых различий средних значений  $ET_{\text{биоуголь}}$  и  $ET_{\text{контроль}}$ .

Увеличение турбулентного потока тепла над участком с внесением биоугля ( $H_{\text{биоуголь}}$ ) происходит из-за увеличения температуры подстилающей поверхности на участке с внесением биоугля (рис. 2). Особенно ярко различия температуры подстилающей поверхности проявляются в начале и середине периода вегетации. Различия в турбулентном потоке тепла обусловлены более высокой температурой подстилающей поверхности с внесением биоугля. Средняя температура подстилающей поверхности на участке с биоуглем составила  $25.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , на контрольном участке –  $24.4 \text{ }^\circ\text{C}$  (увеличение температуры подстилающей поверхности на участке с биоуглем на 6.4% по сравнению с контролем). Увеличение турбулентного потока тепла может также происходить из-за умень-

шения теплопроводности почвы, так как радиационный баланс будет в большей мере расходоваться на передачу энергии от подстилающей поверхности к атмосфере, чем на передачу энергии вглубь почвы.

Биоуголь обладает меньшей отражательной способностью (альбедо) по сравнению с почвой ([Genesio, 2012](#)), но при этом биоуголь увеличивает собственное излучение вследствие увеличения температуры подстилающей поверхности. В результате два противоположных потока радиационного баланса компенсируют друг друга и значимых различий средних значений радиационного баланса на участке с внесением биоугля ( $R_{п \text{ биоуголь}}$ ) и контрольном участке ( $R_{п \text{ контроль}}$ ) обнаружено не было.



**Рис. 2.** Температура подстилающей поверхности (°C) на участке с внесением биоугля и на контрольном участке.

**Fig. 2.** Crop surface temperature (°C) at the plot with biochar application and at the control plot.

Поток тепла в почву сильно зависит от теплофизических свойств почвы, при уменьшении теплопроводности поток тепла в

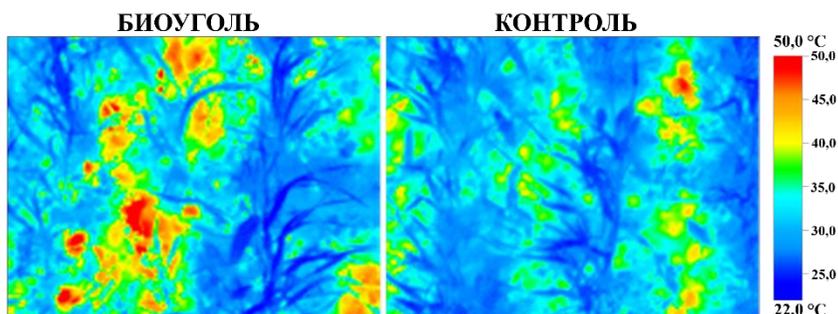
почву уменьшается, однако увеличение температуры поверхности почвы будет приводить к увеличению потока тепла в почву. Таким образом, изменение потока тепла в почву при внесении биоугля будет определяться соотношением влияния вышеперечисленных факторов. В настоящей работе оценка потока тепла в почву связана с радиационным балансом, и значимых различий в потоке тепла в почву на участке с внесением биоугля ( $G_{\text{биоуголь}}$ ) и контрольном участке ( $G_{\text{контроль}}$ ) также обнаружено не было.

Скрытый поток тепла (LE) и суммарное испарение (ET) уменьшались при внесении биоугля, вероятно, из-за снижения испарения почвы ([Wang et al., 2018](#)), а не из-за снижения транспирации. Для проверки данного предположения был проведен анализ температуры листьев растений с помощью тепловизионных изображений, так как температура листьев сильно связана с транспирацией растений ([Gates, 1968](#)). В таблице 6 представлены результаты обработки снимков тепловизионной камеры Testo 868, в таблице 6 представлена температура листьев на участке с внесением биоугля ( $T_{\text{с биоуголь}}$ ) и на контрольном участке ( $T_{\text{с контроль}}$ ). Согласно критерию Манна–Уитни–Уилкоксона значимых различий между температурой листьев на участке с внесением биоугля и на контрольном участке обнаружено не было ( $p\text{-value} > 0.1$ ). На рисунке 3 представлен пример съемки тепловизионной камеры 23.06.2022 г. для участка с внесением биоугля и на контрольном участке.

**Таблица 6.** Температура листьев растений ( $T_{\text{с}}$ , °C) на участке с внесением биоугля и контрольном участке в даты проведения экспериментов

**Table 6.** Leaf temperature ( $T_{\text{с}}$ , °C) on the plot with the biochar application and on the control plot on the experiment's dates

	<b>31.05.</b>	<b>09.06.</b>	<b>23.06.</b>	<b>07.07.</b>	<b>21.07.</b>	<b>04.08.</b>
<b>Время съемки</b>	11:57	12:03	11:54	11:29	13:14	12:34
<b><math>T_{\text{с биоуголь}}</math></b>	16.7	26.3	27.1	23.1	31.7	29.9
<b><math>T_{\text{с контроль}}</math></b>	17.0	26.4	27.4	23.2	31.4	30.3



**Рис. 3.** Тепловое изображение участка с внесением биоугля (слева) и контрольного участка (справа) 23.06.2022 г.

**Fig. 3.** Thermal image of the plot with the biochar application (left) and the control plot (right) on June 23, 2022.

Интегральная температура подстилающей поверхности по съемке тепловизионной камерой 23.06.2022 г. в 11:54 равна 31.9 °С для участка с внесением биоугля и 30.4 °С для контрольного участка. Снижение собственного испарения почвы при внесении биоугля может быть вызвано изменением структуры почвы и изменением ее гидрофизических и теплофизических свойств. Биоуголь увеличивает количество микропор, которые имеют плохую влагопроводность. В результате чего снижается влагоперенос из нижележащих слоев к поверхности почвы (Wang et al., 2018).

В настоящее время активно развивается направление определения влажности почвы и влагообеспеченности растений по результатам оценки тепловой инерции с помощью данных дистанционного зондирования Земли и тепловизионных съемок с беспилотных летательных аппаратов (Lu et al., 2009; Soliman et al., 2013; Qin et al., 2013). На рисунке 4 представлены следующие регрессионные зависимости: зависимость между тепловой инерцией на участке с биоуглем ( $ТИ_{\text{биоуголь}}$ ) и объемной влажностью почвы ( $W_{\text{биоуголь}}$ ); между тепловой инерцией на участке с биоуглем ( $ТИ_{\text{биоуголь}}$ ) и суммарным испарением ( $ET_{\text{биоуголь}}$ ); между тепловой инерцией на контрольном участке ( $ТИ_{\text{контроль}}$ ) и суммарным испарением на контрольном участке ( $ET_{\text{контроль}}$ ). Ниже представлены

значения параметров моделей взаимосвязи теплофизических свойств пахотного горизонта почвы (теплопроводность (K), объемная теплоемкость (C) и температуропроводность(D)) и тепловой инерции (ТИ) с объемной влажностью почвы (W) и суммарным испарением (ET), а также их коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) с *p*-уровнем значимости (*p*-value):

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и теплопроводности для участка с внесением биоугля ( $W_{\text{биоуголь}} \sim K_{\text{биоуголь}}$ ):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.16599 \times K_{\text{биоуголь}} + 0.09877 \quad (R^2 = 0.32, p\text{-value} = 0.107)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для участка с внесением биоугля ( $ET_{\text{биоуголь}} \sim K_{\text{биоуголь}}$ ):

$$ET_{\text{биоуголь}} = 0.47346 \times K_{\text{биоуголь}} + 0.05623 \quad (R^2 = 0.59, p\text{-value} = 0.027)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для контрольного участка ( $ET_{\text{контроль}} \sim K_{\text{контроль}}$ ):

$$ET_{\text{контроль}} = 0.58317 \times K_{\text{контроль}} + 0.01924 \quad (R^2 = 0.75, p\text{-value} = 0.007)$$

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и объемной теплоемкости для участка с внесением биоугля ( $W_{\text{биоуголь}} \sim C_{\text{биоуголь}}$ ):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.19047 \times C_{\text{биоуголь}} - 0.05788 \quad (R^2 = 0.36, p\text{-value} = 0.09)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и объемной теплоемкости для участка с внесением биоугля ( $ET_{\text{биоуголь}} \sim C_{\text{биоуголь}}$ ):

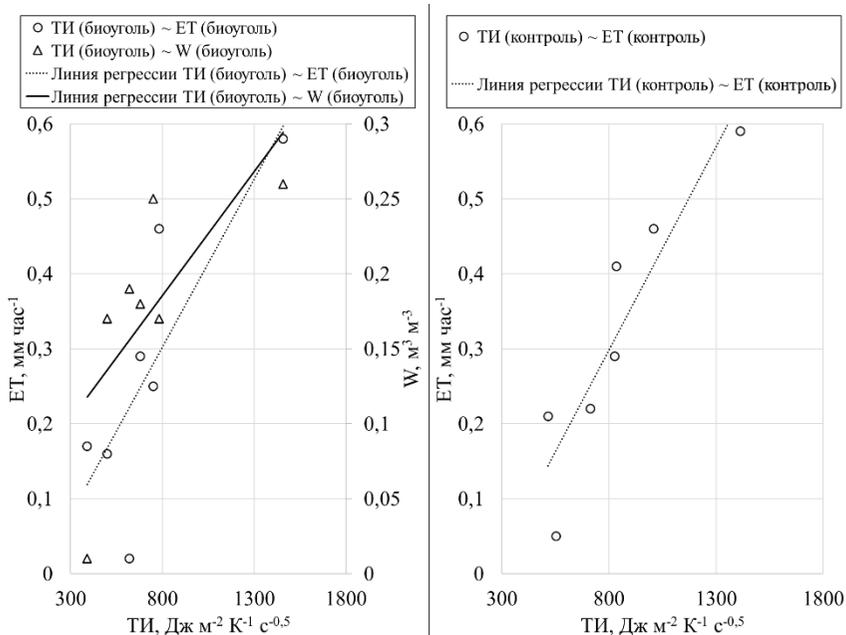
$$ET_{\text{биоуголь}} = 0.5250 \times C_{\text{биоуголь}} - 0.3682 \quad (R^2 = 0.59, p\text{-value} = 0.026)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и объемной теплоемкости для контрольного участка ( $ET_{\text{контроль}} \sim C_{\text{контроль}}$ ):

$$ET_{\text{контроль}} = 0.60799 \times C_{\text{контроль}} - 0.53279 \quad (R^2 = 0.88, p\text{-value} = 0.001)$$

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и температуропроводности для участка с внесением биоугля ( $W_{\text{биоуголь}} \sim D_{\text{биоуголь}}$ ):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.41111 \times D_{\text{биоуголь}} + 0.03200 \quad (R^2 = 0.45, p\text{-value} = 0.059)$$



**Рис. 4.** Регрессионные линии взаимосвязи тепловой инерции (ТИ, Дж м<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup> с<sup>-0.5</sup>) с суммарным испарением (ЕТ, мм час<sup>-1</sup>) и с объемной влажностью почвы ( $W$ , м<sup>3</sup> м<sup>-3</sup>) для участка с внесением биоугля (слева) и для контрольного участка (справа).

**Fig. 4.** Regression lines between thermal inertia (ТИ, J m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> s<sup>-0.5</sup>) and evapotranspiration (ЕТ, mm h<sup>-1</sup>), and soil volumetric moisture ( $W$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) for the plot with the biochar application (left) and for the control plot (right).

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для участка с внесением биоугля ( $ET_{\text{биоуголь}} \sim D_{\text{биоуголь}}$ ):

$$ET_{\text{биоуголь}} = 1.03178 \times D_{\text{биоуголь}} - 0.08497 \quad (R^2 = 0.56, p\text{-value} = 0.032)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и теплопроводности для контрольного участка ( $ET_{\text{контроль}} \sim D_{\text{контроль}}$ ):

$$ET_{\text{контроль}} = 1.3371 \times D_{\text{контроль}} - 0.1475 \quad (R^2 = 0.66, p\text{-value} = 0.017)$$

- Взаимосвязь объемной влажности почвы и тепловой инерции для участка с внесением биоугля ( $W_{\text{биоуголь}} \sim TI_{\text{биоуголь}}$ ):

$$W_{\text{биоуголь}} = 0.0001654 \times \text{ТИ}_{\text{биоуголь}} + 0.0533856 \quad (R^2 = 0.38, \text{p-value} = 0.08)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и тепловой инерции для участка с внесением биоугля ( $\text{ET}_{\text{биоуголь}} \sim \text{ТИ}_{\text{биоуголь}}$ ):

$$\text{ET}_{\text{биоуголь}} = 0.0004479 \times \text{ТИ}_{\text{биоуголь}} - 0.0555895 \quad (R^2 = 0.59, \text{p-value} = 0.026)$$

- Взаимосвязь суммарного испарения и тепловой инерции для контрольного участка ( $\text{ET}_{\text{контроль}} \sim \text{ТИ}_{\text{контроль}}$ ):

$$\text{ET}_{\text{контроль}} = 0.0005430 \times \text{ТИ}_{\text{контроль}} - 0.1361763 \quad (R^2 = 0.81, \text{p-value} = 0.003).$$

Данные регрессионные модели могут найти применение при определении влажности пахотного горизонта почвы на начало вегетации и суммарного испарения, данные величины являются крайне важными при моделировании роста и развития растительности ([Steduto et al., 2009](#)). Однако для построения более полных и точных моделей необходимо провести дополнительные полевые и лабораторные измерения с ненарушенными почвенными образцами во всем диапазоне изменения влажности исследуемой почвы, так как взаимосвязь теплофизических свойств с влажностью почвы и суммарным испарением не является линейной, если рассматривать весь диапазон изменений влажности почвы ([Qin et al., 2013](#)).

## ВЫВОДЫ

В целом анализ показал:

1. Внесение биоугля в условиях влажности почвы в абсолютно сухом состоянии (объемная влажность почвы  $W = 0.01 \text{ м}^3 \text{ м}^3$ ) уменьшило на 29.7% ( $p < 0.05$ ) теплопроводность, уменьшило на 18.5% ( $p < 0.05$ ) объемную теплоемкость, уменьшило на 13.7% ( $p < 0.05$ ) температуропроводность, уменьшило на 24.3% ( $p < 0.05$ ) тепловую инерцию пахотного горизонта супесчаной дерново-подзолистой почвы.

2. Внесение биоугля при значениях влажности почвы, соответствующей наименьшей влагоемкости (объемная влажность почвы  $W = 0.26 \text{ м}^3 \text{ м}^3$ ) увеличило на 9.4% ( $p < 0.05$ ) теплопровод-

ность, уменьшило на 2.6% ( $p < 0.05$ ) объемную теплоемкость, увеличило на 12.3% ( $p < 0.05$ ) температуропроводность, увеличило на 3.2% ( $p < 0.05$ ) тепловую инерцию пахотного горизонта супесчаной дерново-подзолистой почвы.

3. Внесение биоугля незначимо ( $p > 0.1$ ) уменьшило радиационный баланс и поток тепла в почву, значимо ( $p < 0.05$ ) увеличило на 35.5% турбулентный поток тепла, значимо ( $p < 0.05$ ) уменьшило на 17.0% скрытый поток тепла, значимо ( $p < 0.05$ ) уменьшило на 13.9% суммарное испарение.

4. Внесение биоугля значимо ( $p < 0.05$ ) на 6.4% увеличило температуру подстилающей поверхности.

5. Внесение биоугля не оказало значимых ( $p > 0.1$ ) изменений на температуру листьев растений.

Линейные регрессионные модели показали более тесную взаимосвязь теплофизических свойств почвы с суммарным испарением, чем с объемной влажностью почвы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mousses K.G., Zinчук E.G.* Крупномасштабная почвенная карта Меньковского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии // Агрофизика. 2014. Т. 3. № 15. С. 8–17.
2. *Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C.* Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter // Soil science society of America Journal. 2000. Vol. 64. No. 4. P. 1285–1290.
3. *Archontoulis S.V., Huber I., Miguez F.E., Thorburn P.J., Rogovska N., Laird D.A.* A model for mechanistic and system assessments of biochar effects on soils and crops and trade-offs // Gcb Bioenergy. 2016. Vol. 8. No. 6. P. 1028–1045.
4. *Baiamonte G., De Pasquale C., Marsala V., Cimò G., Alonzo G., Crescimanno G., Conte P.* Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments // Journal of Soils and Sediments. 2015. Vol. 15. No. 4. P. 816–824.
5. *Basso A.S., Miguez F.E., Laird D.A., Horton R., Westgate M.* Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils // Gcb Bioenergy. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 132–143.
6. *Bennett L.T., Judd T.S., Adams M.A.* Close-range vertical photography for measuring cover changes in perennial grasslands // Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives. 2000. Vol. 53. No. 6. P. 634–641.

7. *Brunetti C., Lamb J., Wielandt S., Uhlemann S., Shirley I., McClure P., Dafflon B.* Probabilistic estimation of depth-resolved profiles of soil thermal diffusivity from temperature time series // *Earth Surface Dynamics*. 2022. Vol. 10. No. 4. P. 687–704.
8. *Brutsaert W.* On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies // *Water resources research*. 1975. Vol. 11. No. 5. P. 742–744.
9. *Bruun E.W., Hauggaard-Nielsen H., Ibrahim N., Egsgaard H., Ambus P., Jensen P.A., Dam-Johansen K.* Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil // *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35. No. 3. P. 1182–1189.
10. *Cayuela M.L., Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Hanley K., Enders A., Lehmann J.* Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N<sub>2</sub>O emissions? // *Scientific reports*. 2013. Vol. 3. No. 1. P. 1–7.
11. *Cheng C.H., Lehmann J., Engelhard M.H.* Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. Vol. 72. No. 6. P. 1598–1610.
12. *Choudhury B.J., Idso S.B., Reginato R.J.* Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1987. Vol. 39. No. 4. P. 283–297.
13. *De Vries D.A.* *Thermal Properties of Soils*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963. 151 p.
14. *Efimov A.E., Sitdikova Y.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva, L.V.* Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex // *Water resources*. 2018. Vol. 45. No. 1. P. 133–137.
15. *Feng W., Yang F., Cen R., Liu J., Qu Z., Miao Q., Chen H.* Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 277. P.111331.
16. *Foken T.* *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Berlin: Springer Nature, 2021. 1806 p.
17. *Gates D.M.* Transpiration and leaf temperature // *Annual Review of Plant Physiology*. 1968. Vol. 19. No. 1. P. 211–238.
18. *Genesio L.O., Miglietta F.R., Lugato E., Baronti S., Pieri M., Vaccari F.P.* Surface albedo following biochar application in durum wheat // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7. No. 1. P. 014025.
19. *Grossman J.M., O'Neill B.E., Tsai S.M., Liang B., Neves E., Lehmann J., Thies J.E.* Amazonian anthrosols support similar microbial communities that

- differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy // *Microbial ecology*. 2010. Vol. 60. No. 1. P. 192–205.
20. *He H., Dyck M.F., Horton R., Ren T., Bristow K.L., Lv J., Si B.* Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements // *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56. No. 4. P. 567–620.
21. *Jiang C., Yu G., Li Y., Cao G., Yang Z., Sheng W., Yu W.* Nutrient resorption of coexistence species in alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau explains plant adaptation to nutrient-poor environment // *Ecological Engineering*. 2012. Vol. 44. P. 1–9.
22. *Jones H.G., Leinonen I.* Thermal imaging for the study of plant water relations // *Journal of Agricultural Meteorology*. 2003. Vol. 59. No. 3. P. 205–217.
23. *Joseph S.D., Camps-Arbestain M., Lin Y., Munroe P., Chia C.H., Hook J., Van Zwieten L., Kimber S., Cowie A., Singh B.P., Lehmann J.* An investigation into the reactions of biochar in soil // *Soil Research*. 2010. Vol. 48. No. 7. P. 501–515.
24. *Kammann C.I., Schmidt H.P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., Koyro H.W., Conte P., Joseph S.* Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar // *Scientific reports*. 2015. Vol. 5. No. 1. P.1–13.
25. *Khanal S., Fulton J., Shearer S.* An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 139. P. 22–32.
26. *Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil // *Geoderma*. 2010. Vol. 158. No. 3–4. P. 443–449.
27. *Lehmann J., Gaunt J., Rondon M.* Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review // *Mitigation and adaptation strategies for global change*. 2006. Vol. 11. No. 2. P. 403–427.
28. *Lehmann J., Joseph S.* Biochar for environmental management *Science and Technology*. London: Earthscan, 2015. 438 p.
29. *Liang B., Lehmann J., Sohi S.P., Thies J.E., O'Neill B., Trujillo L., Gaunt J., Solomon D., Grossman J., Neves E.G., Luizão F.J.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil // *Organic Geochemistry*. 2010. Vol. 41. No. 2. P. 206–213.
30. *Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils // *Soil science society of America journal*. 2006. Vol. 70. No. 5. P. 1719–1730.

31. *Lin Y., Munroe P., Joseph S., Henderson R., Ziolkowski A.* Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars // *Chemosphere*. 2012. Vol. 87. No. 2. P. 151–157.
32. *Liu S., Lu L., Ma D., Jia L.* Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements // *Hydrology and earth system sciences*. 2007. Vol. 11. No. 2. P. 769–783.
33. *Liu Z., Xu J., Li X., Wang J.* Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in south China // *Geoderma*. 2018. Vol. 323. P. 41–51.
34. *Lu S., Ju Z., Ren T., Horton R.* A general approach to estimate soil water content from thermal inertia // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2009. Vol. 149. No. 10. P. 1693–1698.
35. *Major J., Rondon M., Molina D., Riha S. J., Lehmann J.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol // *Plant and soil*. 2010. Vol. 333. No. 1. P. 117–128.
36. *Oguntunde P.G., Fosu M., Ajayi A.E., Van De Giesen N.* Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil // *Biology and Fertility of soils*. 2004. Vol. 39. No. 4. P. 295–299.
37. *Pietikäinen J., Kiikkilä O., Fritze H.* Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus // *Oikos*. 2000. Vol. 89. No. 2. P. 231–242.
38. *Qin J., Yang K., Lu N., Chen Y., Zhao L., Han M.* Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 138. P. 1–9.
39. *Schmidt H.P., Pandit B.H., Martinsen V., Cornelissen G., Conte P., Kammann C.I.* Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil // *Agriculture*. 2015. Vol. 5. No. 3. P. 723–741.
40. *Sohi S.P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R.* A review of biochar and its use and function in soil // *Advances in agronomy*. 2010. Vol. 105. P. 47–82.
41. *Soliman A., Heck R.J., Brenning A., Brown R., Miller S.* Remote sensing of soil moisture in vineyards using airborne and ground-based thermal inertia data // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. No. 8. P. 3729–3748.
42. *Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E.* AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles // *Agronomy Journal*. 2009. Vol. 101. No. 3. P. 426–437.
43. *Steiner C., Das K.C., Garcia M., Förster B., Zech W.* Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol // *Pedobiologia*. 2008. Vol. 51. No. 5–6. P. 359–366.
44. *Su Z.* The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes // *Hydrology and earth system sciences*. 2002. Vol. 6. No. 1. P. 85–100.

45. *Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer I., Garcia-Pérez M.* The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 574. P. 139–147.
46. *Usowicz B., Lipiec J., Lukowski M., Marczewski W., Usowicz J.* The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow // *Soil and Tillage Research*. 2016. Vol. 164. P. 45–51.
47. *Uzoma K.C., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., Nishihara E.* Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition // *Soil use and management*. 2011. Vol. 27. No. 2. P. 205–212.
48. *Visconti F., de Paz J.M., Martinez D., Molina M.J.* Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils // *Agricultural Water Management*. 2014. Vol. 132. P. 111–119.
49. *Wang T., Stewart C.E., Sun C., Wang Y., Zheng J.* Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils // *Catena*. 2018. Vol. 162. P. 29–39.
50. *Zhang A., Cui L., Pan G., Li L., Hussain Q., Zhang X., Zheng J., Crowley D.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China // *Agriculture, ecosystems & environment*. 2010. Vol. 139. No. 4. P. 469–475.
51. *Zhang H., Voroney R.P., Price G.W.* Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations // *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. Vol. 83. P. 19–28.
52. *Zhang Q., Wang Y., Wu Y., Wang X., Du Z., Liu X., Song J.* Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature // *Soil Science Society of America Journal*. 2013. Vol. 77. No. 5. P. 1478–1487.
53. *Zhao J., Ren T., Zhang Q., Du Z., Wang Y.* Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China Plain // *Soil Science Society of America Journal*. 2016. Vol. 80. No. 5. P. 1157–1166.
54. *Zhao W., Dong X., Wu Z., Wei C., Li L., Yu D., Fan X., Ma Y.* Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status // *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 615. P. 128671.
55. *Zhou Z., Majeed Y., Naranjo G.D., Gambacorta E.M.* Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. P. 106019.

## REFERENCES

1. Moiseev K.G., Zinchuk E.G., Krupnomasshtabnaja pochvennaja karta Men'kovskogo filiala Agrofizicheskogo instituta Rossel'hozakademii (Large-scale soil map of menkovo research station of the agrophysical research institute), *Agrofizika*, 2014, Vol. 3, No. 15, pp. 8–17.
2. Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C., Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter, *Soil science society of America Journal*, 2000, Vol. 64, No. 4, pp. 1285–1290.
3. Archontoulis S.V., Huber I., Miguez F.E., Thorburn P.J., Rogovska N., Laird D.A., A model for mechanistic and system assessments of biochar effects on soils and crops and trade-offs, *Gcb Bioenergy*, 2016, Vol. 8, No. 6, pp. 1028–1045.
4. Baiamonte G., De Pasquale C., Marsala V., Cimò G., Alonzo G., Crescimanno G., Conte P., Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments, *Journal of Soils and Sediments*, 2015, Vol. 15, No. 4, pp. 816–824.
5. Basso. A.S., Miguez. F.E., Laird. D.A., Horton. R., Westgate M., Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils, *Gcb Bioenergy*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 132–143.
6. Bennett L.T., Judd T.S., Adams M.A., Close-range vertical photography for measuring cover changes in perennial grasslands, *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 2000, Vol. 53, No. 6, pp. 634–641.
7. Brunetti C., Lamb J., Wielandt S., Uhlemann S., Shirley I., McClure P., Dafflon B., Probabilistic estimation of depth-resolved profiles of soil thermal diffusivity from temperature time series, *Earth Surface Dynamics*, 2022, Vol. 10, No. 4, pp. 687–704.
8. Brutsaert W., On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies, *Water resources research*, 1975, Vol. 11, No. 5, pp. 742–744.
9. Bruun E.W., Hauggaard-Nielsen H., Ibrahim N., Egsgaard H., Ambus P., Jensen P.A., Dam-Johansen K., Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil, *Biomass and Bioenergy*, 2011, Vol. 35, No. 3, pp. 1182–1189.
10. Cayuela M.L., Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Hanley K., Enders A., Lehmann J., Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N<sub>2</sub>O emissions? *Scientific reports*, 2013, Vol. 3, No. 1, pp. 1–7.

11. Cheng C.H., Lehmann J., Engelhard M.H., Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, Vol. 72, No. 6, pp. 1598–1610.
12. Choudhury B.J., Idso S.B., Reginato R.J., Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, Vol. 39, No. 4, pp. 283–297.
13. De Vries D.A., *Thermal Properties of Soils*, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963, 151 p.
14. Efimov A.E., Sitdikova Y.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V., Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex, *Water resources*, 2018, Vol. 45, No. 1, pp. 133–137.
15. Feng W., Yang F., Cen R., Liu J., Qu Z., Miao Q., Chen H., Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn, *Journal of Environmental Management*, 2021, Vol. 277, pp. 111331.
16. Foken T., *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*, Berlin: Springer Nature, 2021, 1806 p.
17. Gates D.M., Transpiration and leaf temperature, *Annual Review of Plant Physiology*, 1968, Vol. 19, No. 1, pp. 211–238.
18. Genesio L.O., Miglietta F.R., Lugato E., Baronti S., Pieri M., Vaccari F.P., Surface albedo following biochar application in durum wheat, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 1, pp. 014025.
19. Grossman J.M., O'Neill B.E., Tsai S.M., Liang B., Neves E., Lehmann J., Thies J.E., Amazonian anthrosols support similar microbial communities that differ distinctly from those extant in adjacent, unmodified soils of the same mineralogy, *Microbial ecology*, 2010, Vol. 60, No. 1, pp. 192–205.
20. He H., Dyck M.F., Horton R., Ren T., Bristow K.L., Lv J., Si B., Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements, *Reviews of Geophysics*, 2018, Vol. 56, No. 4, pp. 567–620.
21. Jiang C., Yu G., Li Y., Cao G., Yang Z., Sheng W., Yu W., Nutrient resorption of coexistence species in alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau explains plant adaptation to nutrient-poor environment, *Ecological Engineering*, 2012, Vol. 44, pp. 1–9.
22. Jones H.G., Leinonen I., Thermal imaging for the study of plant water relations, *Journal of Agricultural Meteorology*, 2003, Vol. 59, No. 3, pp. 205–217.
23. Joseph S.D., Camps-Arbestain M., Lin Y., Munroe P., Chia C.H., Hook J., Van Zwieten L., Kimber S., Cowie A., Singh B.P., Lehmann J., An

- investigation into the reactions of biochar in soil, *Soil Research*, 2010, Vol. 48, No. 7, pp. 501–515.
24. Kammann C.I., Schmidt H.P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., Koyro H.W., Conte P., Joseph S., Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar, *Scientific reports*, 2015, Vol. 5, No. 1, pp. 1–13.
25. Khanal S., Fulton J., Shearer S., An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, Vol. 139, pp. 22–32.
26. Laird D.A., Fleming P., Davis D.D., Horton R., Wang B., Karlen D.L., Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil, *Geoderma*, 2010, Vol. 158, No. 3–4, pp. 443–449.
27. Lehmann J., Gaunt J., Rondon M., Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review, *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 2006, Vol. 11, No. 2, pp. 403–427.
28. Lehmann J., Joseph S., *Biochar for environmental management Science and Technology*, London: Earthscan, 2015, 438 p.
29. Liang B., Lehmann J., Sohi S.P., Thies J.E., O’Neill B., Trujillo L., Gaunt J., Solomon D., Grossman J., Neves E.G., Luizão F.J., Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil, *Organic Geochemistry*, 2010, Vol. 41, No. 2, pp. 206–213.
30. Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O’Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G., Black carbon increases cation exchange capacity in soils, *Soil science society of America journal*, 2006, Vol. 70, No. 5, pp. 1719–1730.
31. Lin Y., Munroe P., Joseph S., Henderson R., Ziolkowski A., Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars, *Chemosphere*, 2012, Vol. 87, No. 2, pp. 151–157.
32. Liu S., Lu L., Ma, D., Jia L., Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements, *Hydrology and earth system sciences*, 2007, Vol. 11, No. 2, pp. 769–783.
33. Liu Z., Xu J., Li X., Wang J., Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in south China, *Geoderma*, 2018, Vol. 323, pp. 41–51.
34. Lu S., Ju Z., Ren T., Horton R., A general approach to estimate soil water content from thermal inertia, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, Vol. 149, No. 10, pp. 1693–1698.
35. Major J., Rondon M., Molina D., Riha S.J., Lehmann J., Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol, *Plant and soil*, 2010, Vol. 333, No. 1, pp. 117–128.

36. Oguntunde P.G., Fosu M., Ajayi A.E., Van De Giesen N., Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil, *Biology and Fertility of soils*, 2004, Vol. 39, No. 4, pp. 295–299.
37. Pietikäinen J., Kiikkilä O., Fritze H., Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus, *Oikos*, 2000, Vol. 89, No. 2, pp. 231–242.
38. Qin J., Yang K., Lu N., Chen Y., Zhao L., Han M., Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 138, pp. 1–9.
39. Schmidt H.P., Pandit B.H., Martinsen V., Cornelissen G., Conte P., Kammann C.I., Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil, *Agriculture*, 2015, Vol. 5, No. 3, pp. 723–741.
40. Sohi S. P., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R., A review of biochar and its use and function in soil, *Advances in agronomy*, 2010, Vol. 105, pp. 47–82.
41. Soliman A., Heck R.J., Brenning A., Brown R., Miller S., Remote sensing of soil moisture in vineyards using airborne and ground-based thermal inertia data, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, No. 8, pp. 3729–3748.
42. Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E., AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles, *Agronomy Journal*, 2009, Vol. 101, No. 3, pp. 426–437.
43. Steiner C., Das K.C., Garcia M., Förster B., Zech W., Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol, *Pedobiologia*, 2008, Vol. 51, No. 5–6, pp. 359–366.
44. Su Z., The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes, *Hydrology and earth system sciences*, 2002, Vol. 6, No. 1, pp. 85–100.
45. Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer I., Garcia-Pérez M., The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil, *Science of the Total Environment*, 2017, Vol. 574, pp. 139–147.
46. Usowicz B., Lipiec J., Łukowski M., Marczewski W., Usowicz J., The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow, *Soil and Tillage Research*, 2016, Vol. 164, pp. 45–51.
47. Uzoma K.C., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., Nishihara E., Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition, *Soil use and management*, 2011, Vol. 27, No. 2, pp. 205–212.
48. Visconti F., de Paz J.M., Martinez D., Molina M.J., Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating

the water content of irrigated soils, *Agricultural Water Management*, 2014, Vol. 132, pp. 111–119.

49. Wang T., Stewart C.E., Sun C., Wang Y., Zheng J., Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils, *Catena*, 2018, Vol. 162, pp. 29–39.

50. Zhang A., Cui L., Pan G., Li L., Hussain Q., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China, *Agriculture, ecosystems & environment*, 2010, Vol. 139, No. 4, pp. 469–475.

51. Zhang H., Voroney R.P., Price G.W., Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations, *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, Vol. 83, pp. 19–28.

52. Zhang Q., Wang Y., Wu Y., Wang X., Du Z., Liu X., Song J., Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature, *Soil Science Society of America Journal*, 2013, Vol. 77, No. 5, pp. 1478–1487.

53. Zhao J., Ren T., Zhang Q., Du Z., Wang Y., Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China Plain, *Soil Science Society of America Journal*, 2016, Vol. 80, No. 5, pp. 1157–1166.

54. Zhao W., Dong X., Wu Z., Wei C., Li L., Yu D., Fan X., Ma Y., Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status, *Journal of Hydrology*, 2022, Vol. 615, pp. 128671.

55. Zhou Z., Majeed Y., Naranjo G.D., Gambacorta E.M., Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, Vol. 182, pp. 106019.