



УДК 631.436

Теплофизические характеристики почв – основа расчета и управления тепловым режимом почв

Е.В. ШЕИН¹, доктор биологических наук, зав. кафедрой (e-mail: evgeny.shein@gmail.com)
М.А. МАЗИРОВ², доктор биологических наук, зав. кафедрой
Ф.Д. МИКАЙЛОВ³, доктор сельскохозяйственных наук, доцент
А.И. МАРТЫНОВ², аспирант

¹Московский государственный университет имени М.В.

Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Российская Федерация

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

³Университет Ыгдыр, Суверен Кампус, Ыгдыр, 76000, Турция

Качество прогноза и управления гидротермическим режимом почвы зависит, в первую очередь, от наличия экспериментального обеспечения – почвенных характеристик, определяющих процесс прогревания. Наилучшим экспериментальным обеспечением расчетов и систем управления считается то, которое получено в полевых условиях в ненарушенных почвах с природным варьированием их свойств. Цель наших исследований – разработка физически обоснованного полевого метода определения зависимости теплопроводности от влажности почв, как основной теплофизической характеристики. Метод основан на решении задачи теплопереноса в почве конечной и полубесконечной толщины при граничных условиях на поверхности почвы первого рода с одной синусоидальной гармоникой. Новый метод оценки реализован в полевых условиях при определении послойной суточной динамики температуры и одновременно наблюдении за влажностью почвы, апробирован на тяжелосуглинистых агролесных почвах Владимирского ополья. Метод высокопроизводительный, учитывает особенности строения и состава почв в естественных условиях. Величины теплопроводности в области массовых влажностей 0,15–0,25 г/г составляли от 1,5 до 3,0·10⁻³ см²/с.

Результаты традиционных лабораторных определений теплопроводности по методу Кондратьева на образцах нарушенного сложения были в 1,5–2 раза выше, что связано с особенностями используемого метода. Полевые физически обоснованные методы определения тепловых свойств открывают новый этап развития теплофизики почв и позволяют выявить наиболее точные и адекватные методы для прогнозирования и управления их тепловым режимом.

Ключевые слова: почва, моделирование, перенос тепла, граничные условия.

Для цитирования: Теплофизические характеристики почв – основа расчета и управления тепловым режимом почв / Е.В. Шеин, М.А. Мазиров, Ф.Д. Михайлов, А.И. Мартынов // Земледелие. 2016. №6. С. 20–23.

Тепловой режим почвы во многом определяет продуктивность сельскохозяйственных полей. В частности, чем ниже ее температура, тем сильнее растения испытывают фосфорное голодание [1, 2, 3]. Кроме того, миграция и скорость разложения многих агрохимикатов в почве сильно зависят от ее температуры. Поэтому сегодня необходимо не просто знать и контролировать температуру почвы, поддерживая ее в оптимальных пределах (+10–+20 °С), но и уметь прогнозировать величину этого показателя в различных почвенных слоях, особенно в тепличных условиях при управлении температурным режимом надпочвенного воздуха и почвы. Во многие прогнозные и управляющие модели входит блок по расчету температуры почвы. В качестве экспериментального обеспечения он обязательно включает основную теплофизическую функцию – зависимость теплопроводности (в ряде случаев, теплопроводности) от влажности почвы.

Расчет температуры почвы в упомянутых моделях базируется на классическом уравнении теплопроводности, которое (при отсутствии фазовых переходов влаги в почве и переноса

тепла с влагой, а также с допущением, что температурные градиенты связаны только с вертикальным переносом тепла), имеет следующий вид [4–6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $T(x, t)$ – температура почвы в точке x в момент времени t ; κ – коэффициент теплопроводности ($\kappa = \lambda / c_v$, где λ – коэффициент теплопроводности; c_v – объемная теплоемкость).

Суточный (или годовой) ход температуры поверхности почвы – это, в основном, синусоидальная функция времени, и с целью упрощения представляется целесообразным аппроксимировать $\varphi(t)$ периодическим тригонометрическим полиномом:

$$T(0, t) = \varphi(t) = T_0 + \sum_{j=1}^m T_j \cdot \cos(j\omega t + \varepsilon_j), \quad (2)$$

где T_0 – среднесуточная (или годовая) температура деятельной поверхности почвы; m – число гармоник; T_j – амплитуды колебаний температуры поверхности почвы; $\omega = 2\pi/\tau_0$ – круговая суточная (или годовая) частота; τ_0 – период (длина) волны, выраженный в сутках или в годах; ε_j – сдвиги фаз, зависящие от начала отсчета времени (t).

Из уравнения (2) следует, что при увеличении числа слагаемых, приближение улучшается. Чем больше гармоник, тем вероятнее точное (соответствующее реальности) описание $T(0, t)$, но одновременно усложняется вычисление.

Вместо изменения температуры поверхности почвы можно принять условие воздействия на поверхность теплозащитных укрытий с температурой T_b при среднем значении коэффициента конвективной теплоотдачи α . Тепло, поступающее к поверхности почвы от теплозащитных укрытий вследствие конвекции, распространяется в нем посредством теплопроводности. Граничное условие для задачи такого типа имеет вид:

$$\lambda \partial T(0, t) / \partial x = \alpha [T(0, t) - T_b], \quad (3)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена; T_b – температура воздуха, $T(0, t)$ – температура поверхности почвы в момент времени t .

Именно по указанным причинам прогноз температуры деятельного слоя почвы – важнейшая агрофизическая задача. Для решения

приведенного основного уравнения теплопереноса необходимо знать значения – коэффициента температуропроводности (1). Его величина в почве не константна, а определяется, с одной стороны, фундаментальными свойствами почв (гранулометрический состав, плотность, содержание органического вещества и др.), с другой – таким быстроизменяющимся свойством, как влажность, то есть это функция от влажности. Поэтому зависимость температуропроводности от влажности называют «основной теплофизической характеристикой», по аналогии с основной гидрофизической характеристикой, применяемой в почвенной гидрологии. Пока её достоверно определяют только в лаборатории (методом Кондратьева), используя насыпные образцы. В последние годы для такого рода расчетов «основной теплофизической характеристики» также используют педотрансферные функции [5, 6, 7, 8]. Однако их применение в конкретных условиях должно быть экспериментально обосновано, а определение теплофизических функций в специальных экспериментах (лабораторных и полевых) занимает много времени, требует сложного оборудования, строгого соблюдения начальных и поддержания краевых условий, что весьма затруднительно в поле. Поэтому для агрономической практики необходим полевой неразрушающий метод определения указанной зависимости в естественных условиях для конкретного сельскохозяйственного поля.

Для практических расчетов теплового режима могут быть использованы более простые приближенные решения, которые обладают необходимой точностью и соответствуют теоретическому физическому обоснованию процессов распространения тепла в почве. Для этого целесообразно проанализировать влияние наиболее часто используемых в практике упрощений на процесс переноса тепла в почве, оценить влияние краевых условий, отдельных членов и коэффициентов дифференциальных уравнений, а также размеров области на обсуждаемый процесс.

Цель нашей работы заключалась в изучении влияния граничных условий на решение уравнения теплопереноса и разработке методики определения коэффициента температуропроводности почвы, основанной на решении обратных задач уравнения теплопереноса.

Условия, материалы и методы. Определение температуропроводности (κ) конкретного слоя почвы при конкретной влажности возможно

Среднегодовое климатические показатели территории Владимирского ополья (Модель адаптивно-ландшафтного земледелия ..., 2004).

Показатель	Значение
Средняя температура воздуха за год	3,0-3,4°
Средняя температура января	-11°
Средняя температура июля	+17,5°
Переход температуры воздуха весной через 0°	3-5 апреля
Продолжительность вегетационного периода, дней	168-172
Продолжительность периода с температурой выше 10°, дн.	128-132
Сумма осадков за год, мм	575
Среднее число дней со снежным покровом	140-150
Гидротермический коэффициент за вегетационный период (с температурой выше +10°)	1,4

на основе решения обратной задачи: нахождения κ из экспериментально установленной динамики температуры на разных глубинах почвы. Определению κ почвы на основе решения упрощенного уравнения теплопереноса (2) посвящено немало работ, предложено много методов [5, 7-10]. Их реализация предусматривает вычисление усредненного значения коэффициента температуропроводности за рассматриваемый период времени, исходя из постоянства величины κ в слое почвы.

Если температура почвы в течение суток выражается одной гармоникой, например синусоидальной, то коэффициент температуропроводности κ можно найти из величины уменьшения суточной амплитуды температуры с глубиной; по запаздыванию фазы температурной волны на разных глубинах; по изменению температуры почвы на разных глубинах и во времени [4, 5]. Такое определение допускает ощутимые погрешности из-за того, что температура почвы не всегда изменяется строго по синусоидальному закону. Используя принятые допущения метода решения обратных задач, для произвольного периода τ_0 , выводится также формула для расчета κ в следующем виде, на основе изучения запаздывания соответствующей фазы температурной волны на двух разных глубинах:

$$\kappa = \frac{4\pi (x_2 - x_1)^2}{\tau_0 \cdot \ln^2 \left[\frac{(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2}{(T''_1 - T''_3)^2 + (T''_2 - T''_4)^2} \right]}, \quad (4)$$

где T'_i и T''_i – температура почвы на глубинах $x=x_1$ и $x=x_2$ в момент времени $t_i=i \cdot \tau_0/4$ ($i=1, 4$) (например, если $\tau_0=24$ ч, то $t=6, 12, 18$ и 24 ч).

Как видно из формулы (4), измерив температуру почвы на двух глубинах x_1 и x_2 через каждые 6 ч в течение суток, можно вычислить коэффициент температуропроводности без применения специальных приборов.

Именно по формуле (4) и были проведены расчеты температуропроводности в прототипном полевом эксперименте. Коэффициент температуропроводности рассчитывали методом решения обратной задачи на основании данных динамики температуры почвы по слоям.

В качестве объекта исследования были выбраны агросерые почвы Владимирского ополья (сельскохозяйственное поле Владимирского НИИСХ, г. Суздаль), территория которого расположена в северо-западной части Владимирской области на водоразделе рек Клязьмы и Нерли. Ополье представляет собой высокое плато с преобладающими высотами от 200 до 230 м над уровнем моря и имеет форму овала длиной примерно 70 км и шириной 30 км, вытянутого и понижаю-



Рис. 1. Метод монолитов на агросерых почвах Владимирского ополья.

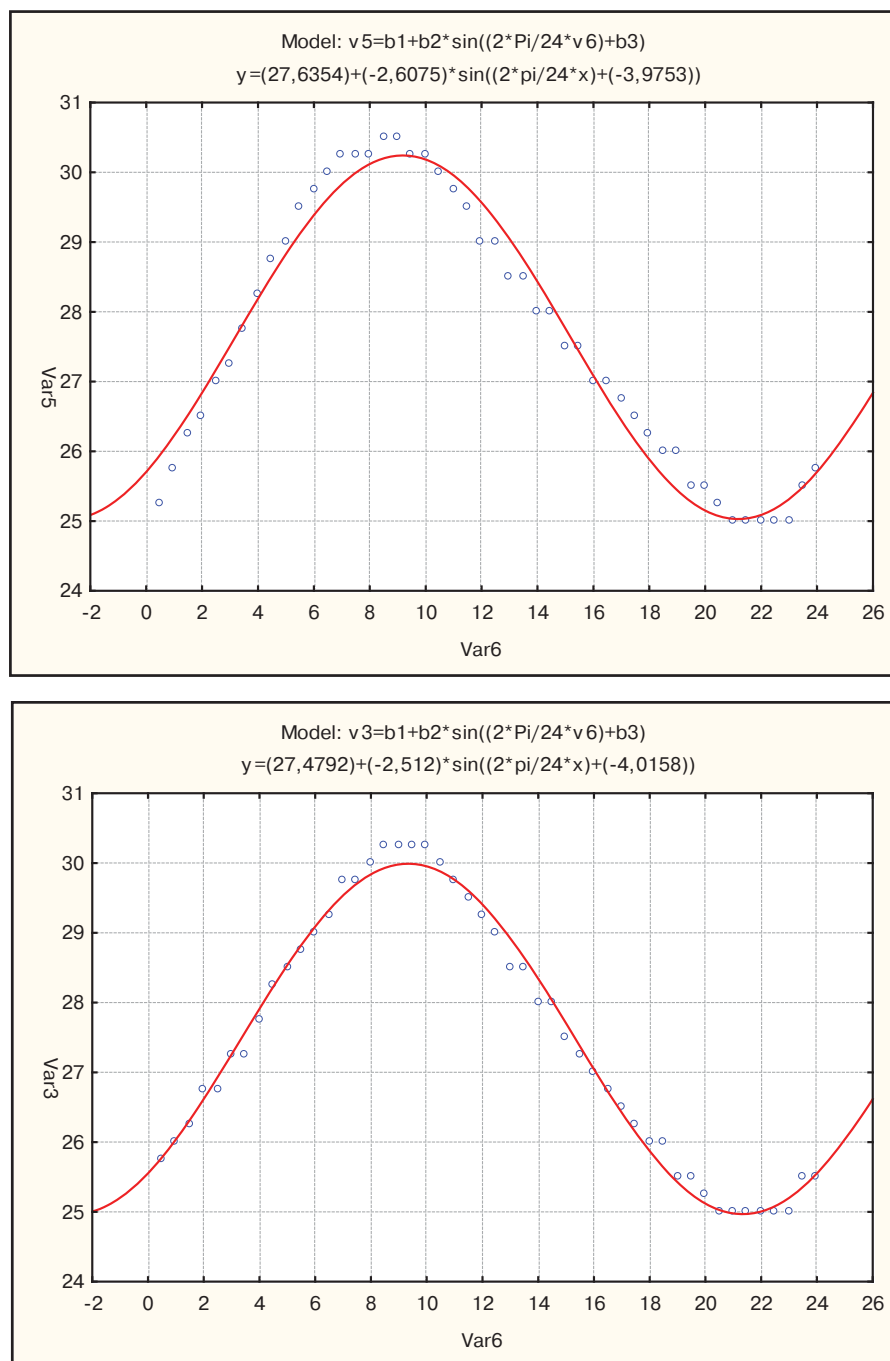


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и аппроксимация синусоидальной функцией температурных данных за одни сутки в программе Statistica 8.

щегося с северо-запада к юго-востоку. По основным биоклиматическим и почвенным показателям Владимирское ополье заметно выделяется среди ландшафтов южно-таёжной зоны (как и все ополья в целом). Главный фактор, определяющий его специфику, – почвообразующие породы (карбонатные лессовидные суглинки).

Ополье характеризуется умеренно-континентальным климатом с тёплым и влажным летом, умеренно-холодной зимой и хорошо выраженными осенним и весенним сезонами. Климат типичен для средней полосы Европейской части России (см. табл.), но обладает некоторыми особенностями, обусловленными открытостью и

безлесьем Ополья (резкие сезонные и суточные изменения погоды).

На опытном участке было заложено два идентичных по размерам почвенных монолита 60 см высотой и 50 см в диаметре. В них на глубинах 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 см установили термодатчики «Термохрон». Боковые стенки монолитов были обернуты пленкой и покрыты монтажной пеной для предотвращения потери влаги и тепла (рис. 1). С целью воссоздания естественных условий температуры монолиты закопали. Для получения значительного интервала влажностей в первый день эксперимента их увлажнили 10 л воды. Бурение на влажность проводили ежедневно.

Полученные результаты динамики температуры и влажности обрабатывали в программе Statistica 8. Для температурной динамики были подобраны уравнения аппроксимации синусоидальной функцией.

Детальные наблюдения за температурой в поверхностных слоях почвы показали, что из-за метеорологических особенностей суточный ход температуры почвы отличается от синусоидального (рис. 2).

Расчет температуропроводности по аппроксимированным данным позволяет избежать ошибок, связанных с отличным от синусоидального хода экспериментальных температурных данных: скачков и колебаний. Они связаны с изменениями в течение дня метеоусловий (солнечной активности, облачности и др.). Поэтому аппроксимация, на наш взгляд, необходима для сглаживания указанных температурных колебаний.

Методом решения обратной задачи была получена функция температуропроводности для поверхностных слоев (A_{max}) агросерых почв Владимирского ополья. Для наглядности приведем сопоставление этих данных с результатами, полученными для той же почвы в лабораторных условиях стандартным общеизвестным методом Кондратьева [11] (рис. 3).

Как видно из графика, точки температуропроводности, рассчитанные методом решения обратной задачи, располагаются ниже точек, установленных по методу Кондратьева. Это связано с использованием во втором случае насыпных образцов, лишенных естественного порового пространства, что способствует более быстрому, чем в естественных условиях, теплопереносу. Также при определении температуропроводности по методу Кондратьева, большую роль играет конвективный теплоперенос (перенос тепла с влагой), связанный с существованием резких температурных градиентов между почвой у стенок погружаемого в термостат цилиндра и почвой в центральной его части. В природных естественных условиях такие градиенты в 40-50 °С, конечно, отсутствуют.

Мы в своем исследовании получили основную теплофизическую функцию для поверхностных (0-10 и 10-20 см) слоев агросерой почвы. Это связано с тем, что температурные колебания настолько резко затухают с глубиной, что на 30-40 см суточные колебания температуры мало заметны. Поэтому в дальнейшем мы планируем модифицировать метод таким образом, чтобы измерять динамику температуры для глубинных слоев почвы аналогично тем способам, которые использовали для поверхностного слоя почвы в

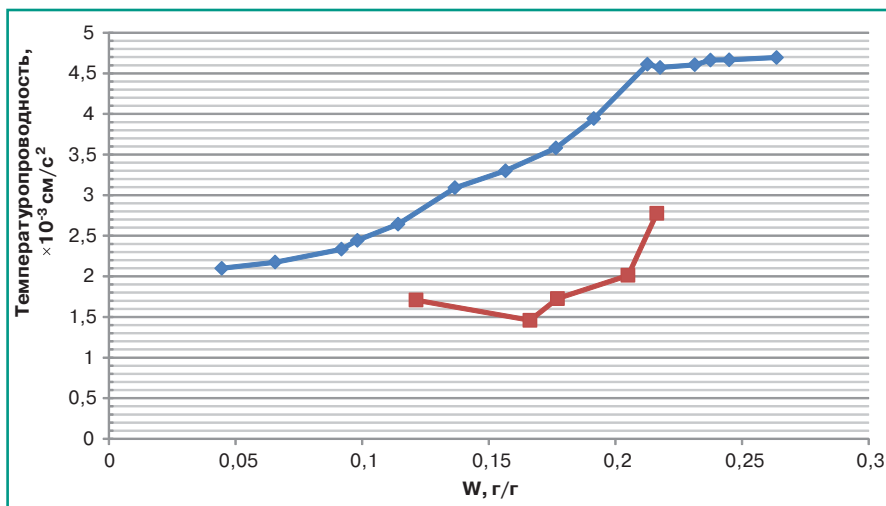


Рис. 3. Зависимость температуропроводности от влажности для горизонта $A_{\text{пах}}$ агросерой почвы Владимирского ополья (г. Суздаль), рассчитанная по методу Кондратьева и методу решения обратной задачи: — температуропроводность, $\times 10^{-3} \text{ см/с}^2$ (метод Кондратьева); — температуропроводность, $\times 10^{-3} \text{ см/с}^2$ (полевой метод).

этом исследовании. Кроме того, учитывая изменчивость метеоусловий, наличие заметного варьирования температуры поверхности почвы, которое удалось «снизить» путем аппроксимации, в дальнейшем мы попытаемся опробовать метод применения двух гармоник для описания температуры поверхности почвы, что позволит учесть колебания температуры, вызванные кратковременными природными метеоявлениями.

Предложены теоретические основы метода определения коэффициента температуропроводности почвы, основанные на решении обратной задачи теплопереноса, и установлены суточные динамики поверхностных слоев агросерой почвы, которые были аппроксимированы синусоидальной функцией. По полученным аппроксимированным данным суточной динамики поверхностных слоев агросерой почвы, используя метод решения обратных задач для расчета коэффициента температуропроводности, были рассчитаны зависимости коэффициента температуропроводности от влажности.

Полученные результаты оказались в 1,5-2 раза ниже показателей, установленных для той же почвы стандартным лабораторным методом Кондратьева, что имеет закономерное объяснение.

В дальнейшем планируется сравнение и статистический анализ результатов использования полученных разными методами функций в прогнозных расчетах моделей температурного режима почв. Этот этап развития полевых методов определения температуропроводности и основной теплофизической характеристики почвы позволит выявить наиболее точный и подходящий для моделиро-

вания метод определения основной теплофизической характеристики – основы экспериментального обеспечения моделей теплового режима почв.

Благодарности. Исследования выполнены за счет средств РНФ, проект № 14-16-00065

Литература.

1. Барбер С. А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. Пер. с англ. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
2. Най П. Х., Тинклер П. Б. Движение растворов в системе почва–растение. М.: Колос. 1980. 365 с.
3. Handbook of Soil Science. Ed. By Malcolm E. Sumner. 2000. CRC Press.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 486 с.
5. Куртнер Д. А., Чудновский А. Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 231 с.
6. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. М.: Наука, 1976. 352 с.
7. Михайлов Ф. Д., Шеин Е. В. Теоретические основы экспериментальных методов определения температуропроводности почв // Почвоведение. 2010. №5. С. 597–605.
8. Horton R. Jr. Determination and use of soil thermal properties near the soil surface. New Mexico State University, 1982. 151 p.
9. Герайзаде А. П. Термо и влагоперенос в почвенных системах. Баку: Изд. Элм, 1982. 159 с.
10. Рычова Т. А. Моделирование температурного режима дерново-подзолистого почв: определяющая роль условий на поверхности // Почвоведение. 1999. №6. С. 697–703.
11. Теории и методы физики почв / под ред. Е. В. Шеина и Л. О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.

The Thermophysical Properties of Soil are the Basis of Calculations and Management of the Soil Thermal Regime

E.V. Shein¹, M.A. Mazirov², F.D. Mikailsoy³, A.I. Martynov²

¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moskva, 119991, Russian Federation

²Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moskva, 127550, Russian Federation

³Iğdır University, Suveren Campus, Iğdır, 76000, Turkey.

Summary. Quality of prediction and management of hydrothermal regime of soil depends primarily on the availability of experimental software – characteristics of soil that determine the process of soil heating. The best experimental software of calculations and control systems is software which has been obtained under field conditions in undisturbed soils with variation of its natural properties. The aim of this work was to develop the physically based field method of obtaining the dependence of the thermal diffusivity of soil moisture, as the fundamental thermophysical characteristic. The method was based on the problem solving of heat transfer in the final and the semi-infinite soil thickness under boundary conditions on the surface of the soil of the first kind with a sinusoidal harmonic. The new method of estimate of main thermophysical function was implemented under field conditions at determining the layered daily dynamics of temperature and at monitoring of soil moisture. The method was tested on the heavy loamy gray forest soils of Vladimir Opolie area. It was highly productive method that considered the structural features of soils under natural conditions. The values of thermal diffusivity of mass moisture 0.15-0.25 g/g were from 1.5 to 3.0 $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$. The data obtained from the evaluation by the traditional laboratory method for determining the thermal diffusivity (by Kondratyev) on the disturbed samples were 1.5-2 times higher. It was due to the features of laboratory determination of basic thermophysical characteristic. Physically-based field methods of the determination of thermal properties open a new stage in the development of soil thermal physics; and it also reveal the most accurate and appropriate methods of science-based prediction and controlling of its thermal regime.

Keywords: soil, modeling, heat transfer, boundary conditions.

Author Details: E.V. Shein, D. Sc. (Biol.), head of department (e-mail: evgeny.shein@gmail.com); M.A. Mazirov, D. Sc. (Biol.), head of department; F.D. Mikailsoy, D. Sc. (Agr.), assoc. prof.; A.I. Martynov graduate student

For citation: Shein E.V., Mazirov M.A., Mikailsoy F.D., Martynov A.I. The Thermophysical Properties of Soil are the Basis of Calculations and Management of the Soil Thermal Regime. *Zemledeleie*. 2016. No.6. Pp. 20-23 (in Russ)