

УДК 631.436

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ

© 2009 Т.А. Архангельская, К.И. Лукьященко

Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва;
e-mail: arhangelskaia@rambler.ru, Lou86@yandex.ru

В статье приводится обзор математических моделей, позволяющих рассчитывать тепловые свойства почв по их основным свойствам. Проведено сопоставление расчетных величин температуропроводности агросерых почв, полученных при использовании ряда моделей, с экспериментальными данными.

Ключевые слова: почва, температуропроводность почвы, математические модели.

При решении целого ряда задач математической экологии, в том числе связанных с моделированием глобальных биосферных процессов и экологическим прогнозированием, возникает необходимость рассчитать температуру почвы, поток тепла в почву, оценить интенсивность теплообмена между почвой и приземным слоем атмосферы и т.п. Для этого помимо метеоданных необходимо знать и тепловые свойства почвы: теплоемкость, теплопроводность и/или температуропроводность, равную отношению теплопроводности к объемной теплоемкости. Если тепловые свойства экспериментально не были определены, их рассчитывают с помощью математических моделей по данным о свойствах твердой фазы почвы и влажности.

Для расчетов теплоемкости почвы практически во всех современных руководствах [23, 32] рекомендуется, а в пакетах программного обеспечения [33] используется модель де Фриза [12, 27]. В рамках подхода де Фриза теплоемкость почвы рассчитывается как сумма теплоемкостей ее составляющих: минералов (при 10°C теплоемкость 0,18 кал/г°Cград), органического вещества (при 10°C теплоемкость 0,46 кал/г°Cград) и почвенной влаги. При этом обычно считают, что теплоемкость почвенной влаги равна 1 кал/г°Cград, независимо от степени ее связанности и концентрации растворенных в ней веществ.

Е.А. Дмитриев [13] полагал, что теплоемкость химически связанной воды равна теплоемкости льда, т. е. 0,45 кал/г°Cград. В диапазоне температур 20-50°C для теплоемкости минералов Е.А. Дмитриев получил величину, близкую к оценке де Фриза – 0,19 кал/г°Cград, и существенно меньшую для почвенной органики – 0,28 кал/г°Cград [13, 14]. Но поскольку доля органической составляющей в твердой фазе почвы обычно составляет единицы процентов, а количество связанной воды тоже очень невелико, оценка теплоемкости

почвы, по Дмитриеву, как показано в работе [2], оказывается близкой к результатам расчета по де Фризу.

Говоря о методах расчетной оценки коэффициентов тепло- и температуропроводности почвы, можно выделить два принципиально различающихся подхода. Первый из них можно условно назвать теоретическим, второй – эмпирическим.

В рамках теоретического подхода развиваются физически обоснованные модели переноса тепла в почве, целью построения которых является получение зависимостей коэффициентов тепло- и температуропроводности почвы от влажности «на кончике пера». В основе таких моделей обычно лежат представления автора о свойствах твердой фазы почвы, в том числе о геометрических характеристиках отдельных минеральных зерен, и о физических закономерностях взаимодействия почвенной влаги с твердой фазой почвы.

Среди исследователей, внесших наибольший вклад в развитие теоретического направления, в первую очередь можно упомянуть таких авторов, как Чудновский [9] и Д.А. де Фриз [12, 27]. Модель А.Ф. Чудновского работает только для сухой почвы и позволяет приближенно рассчитывать ее теплопроводность по данным о плотности, плотности твердой фазы и пористости. Модель де Фриза позволяет рассчитывать теплопроводность влажной почвы при любых значениях влагосодержания, но требует в качестве входных данных дополнительных сведений о минералогическом составе почвы и ряде других почвенных свойств [35, 22]. Подход де Фриза получил свое развитие во многих более поздних работах, в том числе в относительно недавних работах В.Р. Тарнавского [34, 35] и Лю с соавторами [31], предложившими новый способ расчета теплопроводности почвы по данным о плотности, влажности и содержании кварца. Г.С. Кем-

пбелл с соавторами [24] использовали модель де Фриза для оценки величины отклика теплопроводности почв на изменения их температуры; Дж. Эйтзингер с соавторами [28] успешно применили метод де Фриза при расчетах суточной динамики температуры почвы в период промерзания-протаивания. Тем не менее, в целом теоретический подход испытывает определенные трудности в своем развитии, что обусловлено сложностью и множественностью физических процессов, задействованных в переносе тепла в почвах, и трудностями формального количественного описания интенсивности протекания этих процессов.

Эмпирический подход к моделированию зависимости тепло- и температуропроводности почвы от влажности основан на формальной аппроксимации экспериментальных зависимостей с помощью тех или иных функциональных зависимостей с характерным набором параметров и последующем поиске регрессионных соотношений, позволяющих рассчитывать эти параметры по данным об основных свойствах почвы.

В англоязычной литературе первым шагом в эмпирико-статистическом направлении стала модель Керстена [30], основанная на использовании сведений о плотности почвы и плотности твердой фазы, и годная для предсказания теплопроводности почв лишь при высоких значениях влажности. С.О. Чанг и Р. Хортон [25], моделируя влияние мульчирования на потоки тепла и влаги в почве, предложили описывать зависимость теплопроводности почвы от влажности трехпараметрической моделью с эмпирическими коэффициентами, различными для «гипотетических» (выражение авторов модели) песка, супеси и глины. Г.С.Кэмпбелл [23] для описания зависимости теплопроводности почвы от влажности ввел пятипараметрическую функцию с достаточно сложно определяемыми параметрами. Тем не менее, А.Б. МакБратни и Б. Минасни [32] предлагают при расчетах теплопроводности почвы использовать именно модель Кемпбелла. Более простая модель Йохансена [29] основана на использовании данных о степени насыщения почвы влагой и минеральном составе почвы; модификация этой модели принадлежит Коте и Конраду [26]. Как и модель Керстена, модель Коте - Конрада недостаточно хорошо описывает теплопроводность почвы при малых значениях влажности [31].

Практически все существующие модели тепловых свойств почв были разработаны на основе анализа относительно небольших массивов экспериментальных данных, полученных для региональных почв. Так, модель де Фриза [12, 27] была разработана на основе данных М.С. Керстена [30] для некоторых песков, суглинков и по-

чвенных минералов Норвегии и Канады, модель Чанга и Хортон [25] – для суглинистых почв Калифорнии и песчаных почв Нью-Джерси, модель Лю с соавторами [31] – для суглинистых и песчаных почв Китая и Айовы. Для почв России и бывшего СССР были предложены модель Гупало [11] - для южного чернозема, модель Иконниковой [15] - для темно-каштановой почвы (пахотного слоя) и для обыкновенного чернозема; модель Чудновского [21] - для южного и обыкновенного чернозема, темно-каштановой почвы, серозема и дерново-глебоватой почвы, модель Павлова [18] - для промерзающих грунтов Сибири, модели Набиева-Гусейнова [16, 17] - для некоторых типов почв Азербайджанской ССР, модель Бровки-Ровдана [8] - для торфяных почв Белоруссии, модель Тихонравовой-Хитрова [20] - для слитоземов Центрального Предкавказья, модель Архангельской [3-5] - для комплексов агросерых почв перигляциальной области Русской равнины.

Среди опубликованных на русском языке работ выделяется статья А.П. Герайзаде [10], обобщившего свои и литературные данные для температуропроводности пахотного слоя различных типов почв и получившего регрессионную формулу, позволяющую рассчитывать максимальное для данной почвы значение температуропроводности по данным о содержании физической глины. При какой влажности почвы достигается рассчитанный максимум ее температуропроводности, модель Герайзаде оценить не позволяет.

Говоря о методах расчетной оценки тепловых свойств почвы, нельзя не упомянуть о работе Н.В. Серовой [19], поставившей вопрос о необходимости построения карт тепловых свойств почв для решения задачи по определению теплообмена в почве для больших территорий в рамках работ по изучению макропроцессов в атмосфере. Карты теплопроводности и объемной теплоемкости почв для европейской части СССР, построенные Серовой, основаны на учете механического состава, плотности и влажности почвы, и являются весьма приблизительными, но сама постановка вопроса о необходимости создания таких карт сохраняет свою актуальность по настоящее время.

Общим недостатком эмпирических моделей является проблематичность их применения за пределами регрессионной базы. Тем не менее, в качестве успешных примеров такого применения можно привести работы [1] и [6]. В первой из них для моделирования температурного режима водосбора сибирских рек использованы тепловые свойства почвы, рассчитанные по модели Павлова, настроенной по данным для промерзающих

грунтов Сибири [18]. Второй пример – моделирование структуры температурного поля в комплексе агросерых почв южного Подмосковья с использованием модели [3], настроенной по данным для почв Владимирского ополья [7]. Заметим, что в работах [1] и [6] эмпирические модели тепловых свойств региональных почв использованы для расчетов температуры генетически близких объектов. В общем же случае можно ожидать, что использование эмпирических зависимостей для расчетной оценки тепловых свойств почв, не входящих в регрессионную базу модели, будет приводить к значительным ошибкам.

Однако перечисленные выше частные зависимости для региональных почв часто используются как универсальные; в первую очередь это относится к модели де Фриза, позволяющей рассчитывать теплоемкость почвы как сумму теплоемкостей ее составляющих. Так, например, в недавно опубликованной монографии, посвященной современным проблемам моделирования гидрологических процессов в почвах, в соответствующей главе [32] предлагается для расчета теплоемкости почв использовать модель де Фриза, а для расчета теплопроводности – модель Кемпбелла. В температурном блоке широко известного свободно распространяемого программного продукта «HYDRUS-1D» [33], позволяющего рассчитывать динамику переноса влаги в почвах и грунтах, используются эти же модели, но добавлена возможность для расчета теплопроводности использовать модель Чанга и Хортон. При этом в описаниях программных продуктов область применимости использованных моделей не оговаривается, и не приводится даже примерный диапазон ошибок, которые могут получаться при проведении расчетов.

В связи с этим мы провели небольшое исследование, имевшее своей целью оценить возможность применения моделей де Фриза, Кемпбелла, Чанга и Хортон, Лю с соавторами для расчета теплопроводности российских почв, и сопоставить точность вычислений с использованием этих моделей с точностью расчетов по модели Архангельской.

Проверка моделей проводилась на данных, полученных для агросерых почв Владимирского ополья. Почвенный покров ополья представляет собой комплекс почв с мощным гумусово-аккумулятивным слоем, развитых в микропонижениях палеорельефа – в настоящее время это почвы со вторым гумусовым горизонтом (ВГГ), почв с высоким уровнем залегания карбонатов, развитых на палеомикроводоразделах, и почв с переходным строением профиля, сформированных в переходных позициях. Контрастность компонентов почвенной комбинации проявляется в значительной вариабельности их свойств, в том числе тепловых [7].

Используя данные об основных свойствах почв, рассчитывали теплоемкость (модель де Фриза), теплопроводность (модели Чанга-Хортон, Кемпбелла, Лю с соавторами) и теплопроводность почвы (сочетание моделей де Фриза и Чанга-Хортон, Кемпбелла, Лю) при различных значениях влажности. Расчетные величины теплопроводности сравнивали с величинами, полученными в лаборатории с использованием метода регулярного режима (всего 354 экспериментальные точки). Рассчитанные и экспериментально полученные зависимости теплопроводности от влажности для пахотного и минерального горизонтов показаны на рисунке

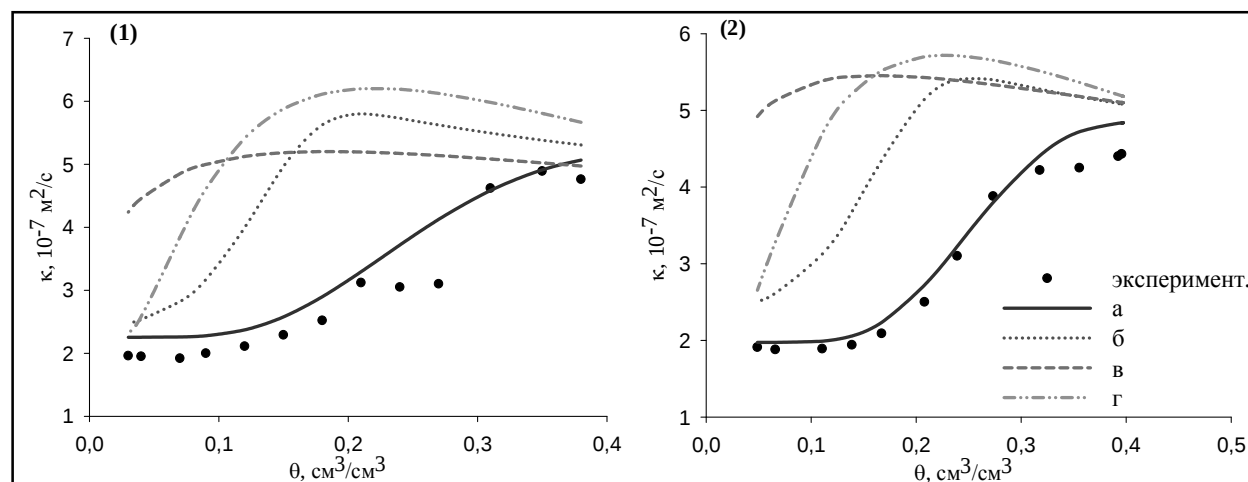


Рис. Зависимость теплопроводности (κ) от влажности (θ) для горизонтов Апах (1) и В (2). Приведены экспериментальные данные [7] и результаты расчета с помощью моделей: а - Архангельской [3-5], б - Кемпбелла [23], в - Чанга и Хортон [25], г - Лю с соавторами [31].

Как видно на рисунке, схемы расчета с помощью моделей Кемпбелла и Лю с соавторами показывают удовлетворительные результаты для воздушно-сухой и насыщенной почвы, переоценивая экспериментальные результаты в остальном диапазоне влажности. Сочетание моделей Чанга-Хортон и де Фриза, использованное в «HYDRUS-1D», не описывает S-образную форму кривой зависимости температуропроводности от влажности для минеральных горизонтов. Для последней схемы расчета характерна значительная переоценка экспериментальных значений температуропроводности при всех значениях влажности, за исключением области насыщения.

В целом точность расчетов с помощью зарубежных моделей была неудовлетворительной. Среднеквадратичная величина расхождений между расчетными и экспериментальными значениями температуропроводности при расчетах по моделям Чанга-Хортон и де Фриза составляла 113,4%. При использовании вместо модели Чанга-Хортон моделей Кемпбелла и Лю с соавторами ошибки расчетов температуропроводности также были весьма значительными: 66% – для модели Кемпбелла и 90,8% – для модели Лю с соавторами.

Модель Архангельской, настроенная по почвам ополья, в применении к независимым данным по температуропроводности суглинистых агросерых и дерново-подзолистых почв давала среднеквадратичные относительные ошибки от 9% для почв ополья (использовались не вошедшие в базу регрессии данные) до 32% для агросерых почв южного Подмосковья и 25% для дерново-подзолистых почв [5]. Таким образом, настроенная по почвам Владимирского ополья модель дает в применении к почвам Русской равнины существенно более высокую точность расчетов, чем модели зарубежных авторов.

Приведенные результаты еще раз подтверждают, что применение полученных для региональных почв эмпирических зависимостей за пределами их регрессионной базы может приводить к возникновению весьма существенных погрешностей. Представляется, что анализ величины этих погрешностей должен быть необходимым этапом при работе с соответствующими моделями. Кроме того, полученные оценки говорят о предпочтительности использования региональных российских моделей, настроенных по почвам сходного генезиса, перед широко распространенными, но по сути узкорегionalными эмпирическими моделями зарубежных авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Хон В.Ч. Моделирование температурного и гидрологического режима водосбора сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 86-93.
2. Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове (на примере агросерых почв центральной части Русской равнины). Дис... на соискание учен. ст. докт. биол. наук. М., 2008. 375 с.
3. Архангельская Т.А. Метод расчетной оценки температуропроводности почвы и его применение для выявления термически инертных зон в комплексном почвенном покрове // Ноосферные изменения в почвенном покрове. Владивосток, Изд-во Дальневост. ун., 2007. С. 432-435.
4. Архангельская Т.А. Новая эмпирическая формула для оценки коэффициента температуропроводности почвы // Материалы научной сессии по фундаментальному почвоведению М., 2004. С. 45-46.
5. Архангельская Т.А. Параметризация и математическое моделирование зависимости температуропроводности почвы от влажности // Почвоведение. 2009. № 2. С. 178-188.
6. Архангельская Т.А. Расчетный метод выявления структуры температурного поля в пахотных почвах палеокриогенных комплексов Русской равнины // Вестн. ОГУ. 2007. Окт. Вып. 75. Ч. 1. С. 28-32.
7. Архангельская Т.А. Температуропроводность серых лесных почв Владимирского ополья // Почвоведение. 2004. № 3. С. 332-342.
8. Бровка Г.П., Ровдан Е.Н. Теплопроводность торфяных почв // Почвоведение. 1999. № 5. С. 587-592.
9. Вершинин П.В., Мельникова М.К., Мичурин Б.Н. и др. Основы агрофизики. М.: Физматгиз, 1959. 903 с.
10. Герайзаде А.П. К вопросу о линейной зависимости коэффициента температуропроводности от механического состава почв // Почвоведение. 1974. № 10. С. 120-123.
11. Гупало А.И. Тепловые свойства почвы в зависимости от ее влажности и плотности // Почвоведение. 1959. № 4. С. 40-45.
12. Де Фриз Д.А. Тепловые свойства почв // Физика среды обитания растений. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. С. 191-214.
13. Дмитриев Е.А. К вопросу о некоторых факторах, определяющих удельную теплоемкость твердой фазы почв // Вест. МГУ. Сер. биол. 1958. № 4. С. 103-111.
14. Дмитриев Е.А. О некоторых закономерностях, определяющих величину и изменения удельной теплоемкости минеральной безводной части

- почв и горных пород // Вест. МГУ. Серия биол. 1959. № 3. С. 79-84.
15. Иконникова Е.А. Исследование влияния обработки почвы на ее тепловой режим. Л., 1965.
16. Набиев Э.Ю., Гусейнов С.Б. Зависимость теплопроводности почв от содержания физической глины и влажности // Почвоведение. 1990. № 8. С. 139-143.
17. Набиев Э.Ю., Гусейнов С.Б. О зависимости коэффициента теплопроводности почв от содержания физической глины // Почвоведение. 1990. № 10. С. 149-151.
18. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
19. Серова Н.В. Распределение теплофизических характеристик почв по европейской территории СССР // ГГО. 1969. Вып. 241. С. 95-107.
20. Тихонравова П.И., Хитров Н.Б. Оценка теплопроводности слитоземов Центрального Предкавказья // Почвоведение. 2003. № 3. С. 342-351.
21. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. М.: Наука, 1976. 352 с.
22. Bachmann J., Horton R., Ren T., van der Ploeg R.R. Comparison of the thermal properties of four wettable and four water-repellent soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. V. 65. P. 1675-1679.
23. Campbell, G.S. Soil physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems. Elsevier, 1985.
24. Campbell G.S., Jungbauer J.D., Bidlake W.R., Hungerford R.D. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity // Soil Sci. 1994. V. 158. P. 307-313.
25. Chung, S.-O., and R. Horton (1987), Soil Heat and Water Flow With a Partial Surface Mulch // Water Resour. Res., 1987. V. 23, № 12. P. 2175-2186.
26. Cate J., Konrad J.-M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials // Can. Geotech. J. 2005. V. 42. P. 443-458.
27. De Vries D.A. Thermal properties of soils // Van Wijk W.R. (ed.) Physics of plant environment. Amsterdam: North Holland Publishing Company. 1963. P. 210-235.
28. Eitzinger J., Parton, W.J., Hartman M. Improvement and validation of a daily soil temperature submodel for freezing/thawing periods // Soil Science. July 2000. V. 165(7). P. 525-534.
29. Johansen O. Thermal conductivity of soils. Ph.D. diss. Norwegian Univ. of Science and Technol., Trondheim. 1975. (CRREL draft transl. 637, 1977).
30. Kersten M.S. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils // ACFEL Tech. Rep. 23. Univ. of Minnesota. Minneapolis, 1949.
31. Lu S., Ren T., Gong Y. Horton R. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. V. 71. P. 8-14
32. McBratney A.B., Minasny B. Soil inference systems // Pachepsky Ya., Rawls W.J. (Eds) Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Elsevier, 2004. P. 323-348.
33. Tarnawski V.R., Gori F. Enhancement of the cubic cell thermal conductivity model // Intern. J. Energy Res. 2002. V. 26 P. 143-157.
34. Tarnawski V.R., Wagner B. A new computerized approach to estimating the thermal properties of unfrozen soils // Can. Geotech. J. 1992. V. 29. P. 714-720.

CONVENTIONAL APPROACHES TO ESTIMATING THERMAL PROPERTIES OF SOILS

© 2009 T.A. Arkhangelskaya, K.I. Lukyashenko

Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow;
e-mail: arhangelskaia@rambler.ru, Lou86@yandex.ru

The article provides an overview of mathematical models to compute the thermal properties of soils on their basic properties. The calculated values of thermal diffusivity of agrogray soils derived from using a number of models are compared with experimental data.

Key words: soil, thermal diffusivity of soils, mathematical models.