

DOI:

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ С ВЕРХНИМ ГРАНИЧНЫМ УСЛОВИЕМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е. В. Шеин^{1,2}, А. Г. Болотов³

¹ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова;*

² *Почвенный институт им. В. В. Докучаева;*

³ *Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К. А. Тимирязева*

В статье предложен расчет температурного режима почвы с верхним граничным условием на основе данных дистанционного зондирования, полученных в результате спутниковой съемки. Установлено, что расчетные температуры близки по значениям к экспериментальным данным. Предложенный подход можно рекомендовать для послойного прогнозирования температуры в почвенном профиле.

CALCULATION OF TEMPERATURE SOIL MODE WITH UPPER BORDER CONDITION ON THE BASIS OF REMOTE SENSING DATA

E. V. Shein^{1,2}, A. G. Bolotov³

¹ *Moscow State University named after M. V. Lomonosov;*

² *Soil Institute named after V. V. Dokuchaev;*

³ *Russian State Agrarian University – MAAA named after K. A. Timiryazev*

The paper suggests a calculation of the temperature regime of the soil with an upper boundary condition based on remote sensing data obtained as a result of satellite imagery. The main source of medium resolution data was archived information (TERRA satellite – EOS AM-1). Comparison of dependent samples of the temperature of terrestrial and satellite measurements indicates that they do not differ reliably from each other. The temperature of the soil surface was also synchronized at depths throughout the entire profile of the soil (with increments of 5–10 cm). Modeling of the temperature regime of soils has been carried out using the predictive model Hydrus-1D. The study was conducted within the framework of a special field experiment with a monolith with by diameter of 100 cm and a depth of 60 cm. The side walls of the monolith were wrapped with a film and covered with a mounting foam, then buried to prevent lateral losses of moisture and heat. The calculated temperatures are close in values to the experimental data. There was a discrepancy between the time at which the maximum design temperatures came in relation to the experimental run at depths more than 5 cm. This may be due to an inaccurate specification of the thermal diffusivity, in combination with a violation of the «harmony» of the diurnal temperature variation. So, at a depth of 5 cm, the lag of the maximum of the calculated temperature variation with respect to the experimental temperature was 3 hours, and at a depth of 10 cm – 4 hours. In conclusion, we note that for large-scale measurements of soil temperature, remote sensing data can be used as the upper boundary condition, and the soil temperature at depths can be calculated using mathematical modeling methods.

Современное управление как водным, так и тепловым режимами почв основывается на прогнозных поливариантных расчетах водного и теплового режимов и выборе оптимального варианта воздействия на почвенный покров с целью их улучшения. В основе такого рода расчетов лежит использование математических моделей переноса тепла и влаги в почве (Микайылов, Шеин, 2010; Шеин, Рыжова, 2016; Болотов, 2017).

При известных начальных и граничных условиях можно предложить различные решения прямой задачи теплопереноса, то есть определения динамики температуры на заданной глубине. В частности, значительный практический интерес представляют задачи по установлению связи теплопроводности почвы с периодически изменяющейся температурой на поверхности. При решении ряда задач с помощью рассмотренной модели можно с достаточной точностью оценить температуру в почвенном профиле. При этом существенно сокращается объем экспериментальных исследований.

Для расчета температурного режима почвы в качестве верхнего граничного условия 1-го рода предлагается использовать данные дистанционного зондирования, полученные в результате спутниковой съемки. В настоящем исследовании в качестве основного источника данных среднего разрешения использовалась архивная информация со спутника *TERRA (EOS AM-1)*. Для практической реализации граничного условия на поверхности 1-го рода был проведен подспутниковый эксперимент по измерению температуры поверхности почвы в нескольких точках поля с дальнейшим усреднением данной величины.

Исследование проводилось в рамках специального полевого эксперимента с монолитом диаметром 100 см и глубиной 60 см. Боковые стенки монолита были обернуты пленкой и покрыты для изоляции монтажной пеной, затем закопаны с целью предотвращения боковых потерь влаги и тепла. Такая методика позволила точно соблюсти условие одномерного (вертикального) передвижения влаги и тепла в почвенном профиле и использовать все балансовые соотношения, так как благодаря изоляции стенок

были устранены трудно учитываемые потери влаги и тепла на боковое растекание.

Объектом исследования являлась дерново-подзолистая почва Зеленоградского стационара Почвенного института им. В. В. Докучаева в районе с. Ельдигино (Пушкинский район Московской области). Почвы данного опорного пункта являются хорошо изученными, результаты их исследований представлены в литературе (Шеин с соавт., 2015).

Измерения температуры почвы проводились с 31 июля по 5 августа 2016 г. с помощью термодатчиков *Termochron*, предварительно запрограммированных на снятие показаний с интервалом 15 мин. Датчики были установлены по всему профилю почвы (с шагом 5–10 см). Наземные измерения проводились в момент фактического пролета спутника (зонд *MODIS*). Соответствие между данными дистанционного зондирования и результатами наземных контактных измерений (данные о температуре поверхности почвы) показано на рис. 1.

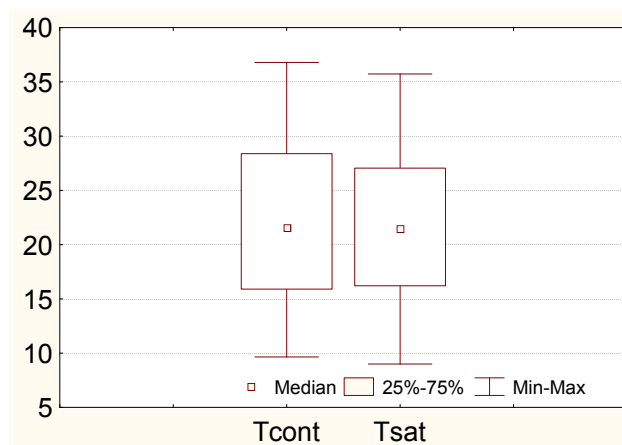


Рис. 1. Статистики различий между показателями температуры поверхности почвы, определенными при помощи спутниковых данных (*Tsat*) и наземных контактных измерений (*Tcont*)

Сравнение зависимых выборок по критерию Вилкоксона показало, что они достоверно не различаются. На рисунке видно, что между дистанционными и наземными данными существует тесная корреляция, поэтому при решении практических задач по моделированию температурного режима почв возможно использование спутниковых данных в качестве верхнего граничного условия.

Для практической реализации рассмотренной модели было проведено экспериментальное измерение температуры почвы на различных глубинах. Моделирование температурного режима почв проводилось с использованием прогнозной модели *Hydrus-1D* (Simunek et al., 2005). В современных моделях и, в частности, в физически обоснованной модели *Hydrus* доступны два типа верхних граничных условий – распределение температуры (T_0) и теплопотока (q_0) на поверхности почвы. В настоящем исследовании использован первый тип распределения температуры (T_0) в виде ряда данных дистанционного зондирования. Нижнее граничное условие задано в виде распределения температуры на некоторой глубине почвы (L), нижней границе расчетного слоя:

$$T(x, t) = T_0(t), x = 0, x = L. \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + TC_w q = T_0 C_w q_0, x = 0, x = L. \quad (2)$$

Также нижнее граничное условие можно задать в виде нулевого градиента температуры. При этом начальное условие задается в виде:

$$T(x, 0) = T_i(x).$$

Результаты полевых измерений температуры почвы представлены на рис. 2.

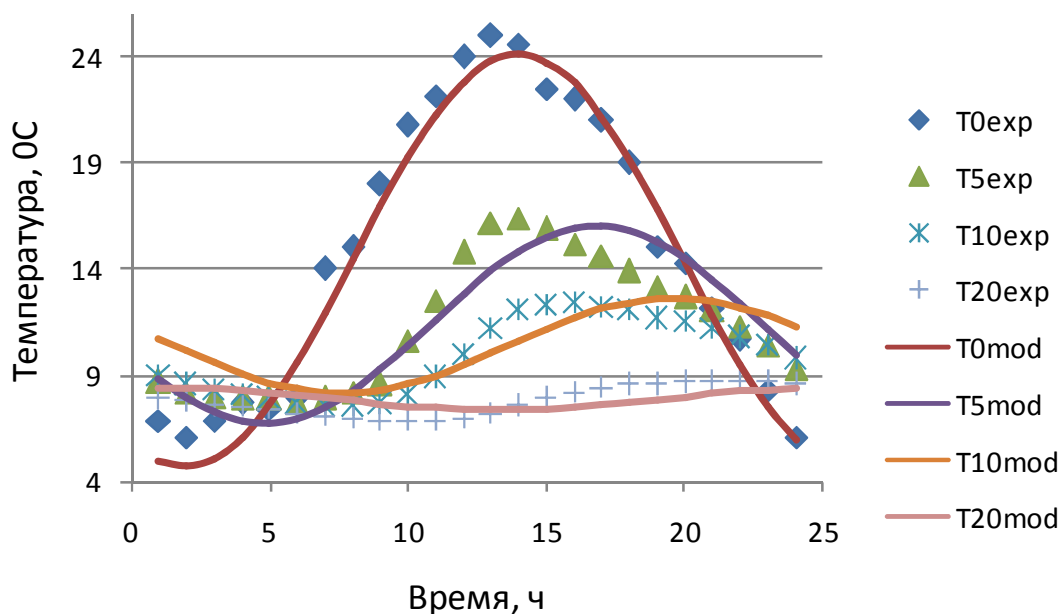


Рис. 2. Расчет суточного хода температуры почвы по глубинам с верхним граничным условием на основе данных дистанционного зондирования

На рис. 2 видно, что расчетные температуры близки по значениям к экспериментальным данным. На глубинах более 5 см отмечено несоответствие времени наступления максимальных расчетных температур экспериментальному ходу. Это может быть связано с неточным заданием коэффициента температуропроводности в совокупности с нарушением «гармоничности» суточного хода температуры, что отчетливо видно на рис. 2 (глубины 5 см и 10 см). Так, на глубине 5 см запаздывание максимума расчетного хода температуры относительно экспериментального составило 3 часа, а на глубине 10 см – 4 часа.

В заключение следует отметить, что при масштабных измерениях температуры почвы возможно использование данных дистанционного зондирования в качестве верхнего граничного условия, а температуру почвы на глубинах можно рассчитать при помощи методов математического моделирования.

Список литературы

1. Болотов А. Г. Гидротермическое состояние почв юго-востока Западной Сибири: дисс. ... докт. биол. наук. М., МГУ им. М. В. Ломоносова, 2017. 351 с.
2. Михайлов Ф. Д., Шеин Е. В. Теоретические основы экспериментальных методов определения температуропроводности почв // Почвоведение. 2010. № 5. С. 597–605.
3. Шеин Е. В., Рыжова И. М. Математическое моделирование в почвоведении. Учебник. М.: «ИП Маракушев А. Б.», 2016. 377 с.
4. Шеин Е. В., Скворцова Е. Б., Панина С. С., Умарова А. Б., Романенко К. А. Гидродепозитарные и гидропроводящие свойства при моделировании влагопереноса в дерново-подзолистых почвах с помощью физически обоснованных моделей // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 71–82. http://www.esoil.ru/publications/bulletin/80_2015_ins.htm.
5. Simunek J., van Genuchten M. Th., Sejna M. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0 [Text]. Department of Environmental Sciences University of California, Riverside, California. 2005. 240 p.