

4. Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.
 5. Shramm G. Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii. – M.: KolosS, 2003. – 311 s.
 6. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics –

- Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil and Tillage Research. – 2006. – Vol. 91 (1-2). – P. 1-14.
 7. Mezger T.G. (2011). The Rheology Handbook. 3rd edn, Vincentz Network GmbH, Hannover.



УДК 631.436

С.В. Макарычев, А.Г. Болотов
 S.V. Makarychev, A.G. Bolotov

**К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ**

**THE ISSUE OF APPLICATION OF COMPUTATIONAL METHODS TO DETERMINE SOIL
 THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS**

Ключевые слова: объемная и удельная теплоемкости, теплопроводность, температуропроводность, влажность, температура, плотность, дисперсность, гумус.

Keywords: volumetric and specific thermal capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity, moisture content, temperature, density, dispersion, humus.

Математическое моделирование процессов переноса тепла в почве предполагает использование теплофизических коэффициентов, полученных с помощью экспериментальных методов. Их знание позволило получить многофункциональные зависимости тепло- и температуропроводности от почвенно-физических факторов, таких как влажность, плотность, температура, степень дисперсности, содержание органического вещества. Для определения объемной и удельной теплоемкости почвы разработан экспресс-метод, основанный на теории подобия и критериальных соотношениях. Полученные модели позволяют оперативно и с хорошей степенью достоверности рассчитывать параметры теплофизического состояния почв в любой момент вегетации, исходя из реально складывающихся в почвенном профиле гидротермических режимов. Это дает возможность оценить и прогнозировать степень воздействия определенных агротехнических и мелиоративных приемов на оптимизацию теплофизических свойств почв разного генезиса.

Mathematical modeling of the heat transfer processes in soil involves the use of the thermophysical factors obtained by experimental methods. The knowledge of these factors enabled to obtain multifunctional dependences of thermal conductivity and thermal diffusivity on soil physical factors as moisture content, density, temperature, degree of dispersion and organic matter content. To determine the soil volumetric and specific thermal capacity, a rapid method based on the similarity theory and criterion relations has been developed. The obtained models enable to quickly and with a high degree of reliability calculate the parameters of soil thermophysical condition at any specific time of a growing season based on the actual hydrothermal regimes evolving in a soil profile. This makes it possible to evaluate and forecast the impact degree of certain agronomic and reclamation techniques on the optimization of the thermal properties of the soils of different genesis.

Макарычев Сергей Владимирович, д.б.н., проф., зав. каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-83-53. E-mail: phys_asau@rambler.ru.

Makarychev Sergey Vladimirovich, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Physics Dept., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-53. E-mail: phys_asau@rambler.ru.

Болотов Андрей Геннадьевич, к.с.-х.н., доцент, каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-83-53. E-mail: agbolotov@gmail.com.

Bolotov Andrey Gennadyevich, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Physics Dept., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-53. E-mail: agbolotov@gmail.com.

Введение

Изучению теплофизических характеристик почв и методам их определения посвящено большое количество работ [1-3]. Из экспериментальных методов, использу-

емых в лабораторных исследованиях, по нашему мнению, наиболее перспективны импульсные, основанные на определении параметра нестационарного температурного поля в первой стадии его развития. Осо-

бенностью такого процесса является выравнивание температуры в неограниченной среде после прекращения действия плоского нагревателя. При этом имеет место максимум температуры в исследуемой точке. Время наступления максимума и его величина зависят от теплофизических параметров среды, в нашем случае почвы. Эти величины определяются на основе решения уравнения Фурье с известными граничными условиями [4].

Для нахождения теплофизических коэффициентов почвы в полевых и лабораторных условиях разработаны отдельные расчетные экспресс-методы [5-7]. Тем не менее эти разработки не позволяют оперативно определить удельную теплоемкость, тепло- и температуропроводность почвы, исходя из ее известных значений влажности, температуры, плотности, дисперсности и содержания органического вещества.

Объекты и методы

Для разработки расчетных методов определения теплофизических характеристик почвы были экспериментально измерены теплоемкость, тепло- и температуропроводность почв разного генезиса. Таким образом, объектами исследований явились черноземы, каштановые, серые лесные и дерново-подзолистые почвы Алтайского края. Цель работы – разработка и использование расчетных методов для определения теплофизических коэффициентов почвы. Задача – на основе имеющихся экспериментальных данных получить математические модели, позволяющие вычислить теплоемкость, тепло- и температуропроводность почвенного покрова Алтайского края.

Результаты исследований

Математическое моделирование процессов переноса тепла в почве предполагает использование теплофизических коэффициентов, полученных с помощью экспериментальных методов. Проведение модельных расчетов основано на знании непрерывных функциональных зависимостей указанных коэффициентов от различных почвенно-физических параметров, таких как влажность, температура, плотность, дисперсность, содержание гумуса.

В случае отсутствия экспериментальных данных по теплоаккумуляции и теплопереносу исследуемых почв применяют модели, связывающие тепловые свойства почв с базовыми физическими параметрами, которые определяются при почвенном обследовании и известны для почв Алтайского края.

В связи этим нами были экспериментально изучены прямые зависимости теплофизических характеристик от отдельных почвенно-физических параметров, таких как физико-механические, водно-физические и некоторые другие свойства почв. Это дало возможность на основе множественной корреляции разработать ряд математических моделей, позволяющих достаточно оперативно проводить анализ теплофизического состояния почвенного профиля.

Прежде всего были найдены соотношения для почв с однородным гранулометрическим составом, который является наиболее консервативным почвенным показателем. Данные зависимости позволили учесть три наиболее динамичные почвенно-физические факторы: влажность (U), плотность (ρ) и температуру (T), регулирование которыми помогает создавать оптимальный для произрастающих агроценозов теплофизический режим. В то же время такие показатели, как температура и влажность почвы сильно варьируют в течение вегетационного периода, поэтому изначальное состояние почвы, как физического тела, более правильно оценивать на основе стабильных почвенных факторов, таких как степень дисперсности (D) и содержание органического вещества (N). Сюда же относим и плотность сложения генетических горизонтов, довольно постоянную, особенно на целинных землях или почвах, занятых многолетними травами.

С учетом указанных факторов нами были разработаны многофункциональные математические модели для расчетов коэффициентов тепло- и температуропроводности почв в абсолютно сухом состоянии:

$$\lambda = 0,2 + 0,29(1 - 0,01D)^3 + \frac{1550 - \rho}{2200} - 5 \times 10^{-3}N;$$

$$a = 0,14 + 0,3(1 - 0,01D) + \frac{1550}{2200} - 0,012N,$$

где D – степень дисперсности, т.е. количество частиц меньше 0,01 мм, %;

N – содержание органического вещества, %;

ρ – плотность, кг/м³.

Из этих выражений следует, что характер изменения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности практически одинаков, хотя степень их изменения в зависимости от того или иного фактора может быть различной. Относительная погрешность между расчетными и экспериментальными значениями коэффициен-

тов теплопередачи менее 205, что для полевых условий вполне приемлемо.

Итак, полученные модели позволяют с хорошей степенью достоверности рассчитывать параметры теплофизического состояния почв в любой момент вегетационного периода, исходя из реально складывающихся в почвенном профиле гидротермических режимов. Это дает возможность оценить и прогнозировать степень воздействия определенных агротехнических и мелиоративных приемов на оптимизацию тепловых свойств почв разного генезиса.

Следует отметить, что для полного описания теплофизического состояния почвенного покрова Алтайского края необходимо знание всего комплекса теплофизических коэффициентов, к которым относится и теплоемкость. Это важнейшая тепловая характеристика почвы, определяющая ее теплоаккумуляционные способности. Высокая теплоемкость обуславливает накопление тепловой энергии в летний период, что препятствует проникновению отрицательных температур в нижние слои почвенного профиля в зимнее время. Экспериментальное определение объемной, а вместе с тем и удельной теплоемкости осуществляется в лаборатории с помощью импульсного метода плоского источника тепла.

Для оперативного определения теплоемкости почвы в полевых условиях необходимо ее знание в любой момент вегетационного периода, что позволяет сделать толь-

ко расчетный метод. Поэтому нами был разработан экспресс-метод, позволяющий найти удельную теплоемкость генетических горизонтов почвенного профиля.

Экспериментальное изучение теплофизических коэффициентов почв позволило определить температурные коэффициенты объемной теплоемкости горизонтов различного гранулометрического состава в зависимости от степени почвенного увлажнения

$$\beta = \frac{d(C\gamma)}{dT} \quad (\text{рис. 1}).$$

Производя графическое дифференцирование кривых 1-4, найдем скорость изменения температурного коэффициента $\frac{d\beta}{dU}$ в различных диапазонах увлажнения (табл. 1).

Полученные значения $\frac{d\beta}{dU}$ представлены

кривыми 1-4 (рис. 2). Анализ этих кривых показывает, что они имеют пять экстремальных точек: минимальные значения в абсолютно-сухом состоянии и при полной влагоемкости; максимальное значение при U_m , а также две сингулярные точки: одна – при максимальной гигроскопичности (МГ), а вторая соответствует наибольшему значению коэффициента температуропроводности в песке – при $KВ$, в супеси – при $НВ$, в суглинке – при $ВРК$, а в глине – при влажности, смещенной к $ВЗ$.

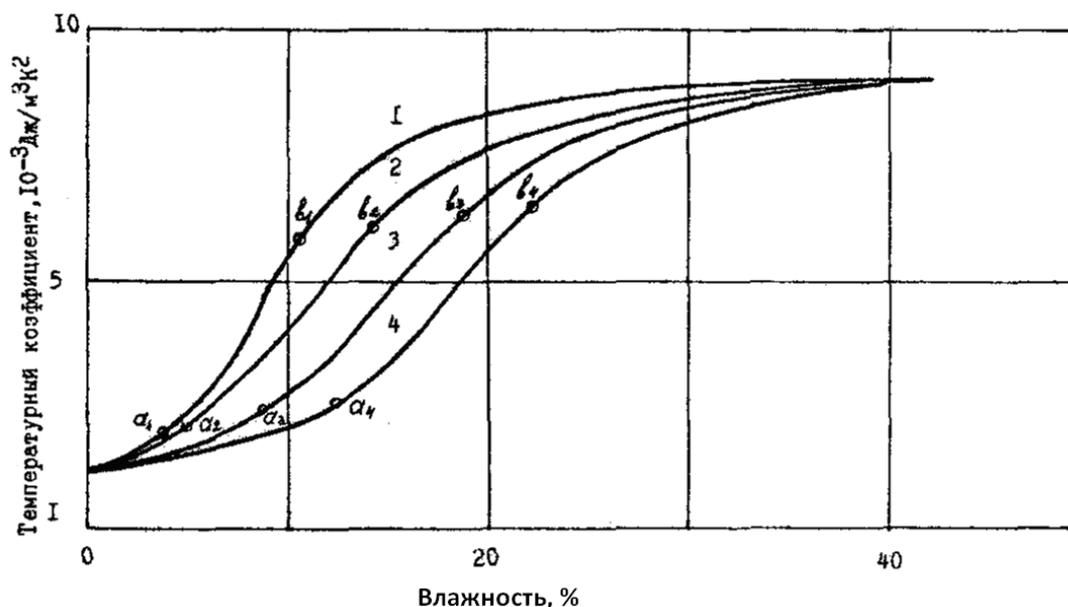


Рис. 1. Зависимость температурного коэффициента объемной теплоемкости кварцевого песка (1), супеси (2), суглинки (3) и глины (4) в зависимости от влаги

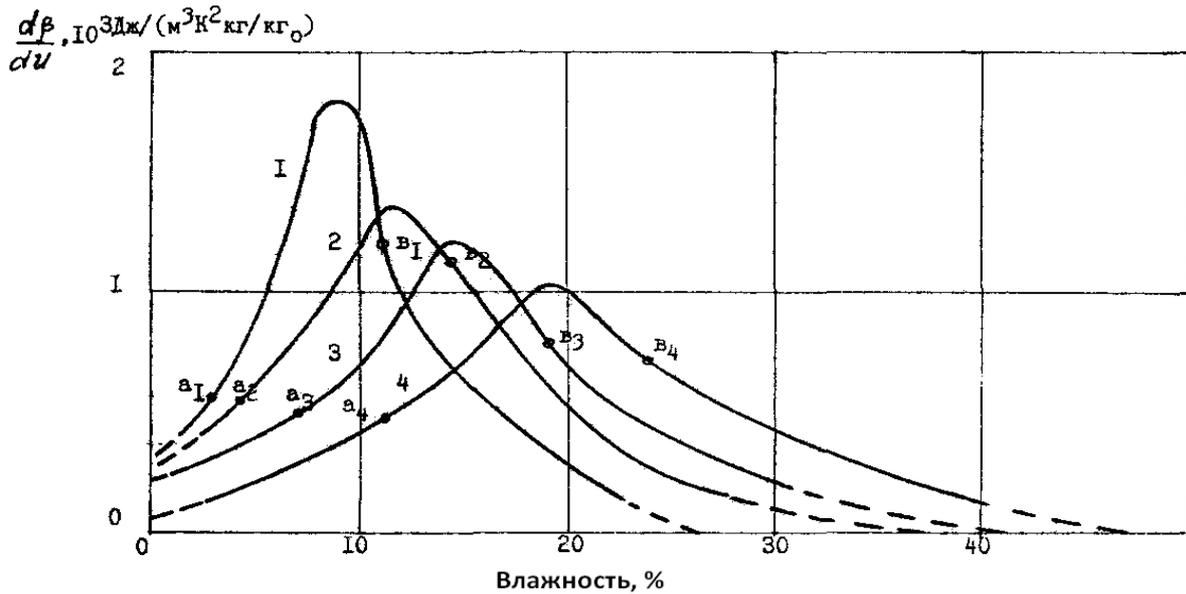


Рис. 2. Скорость изменения температурного коэффициента объемной теплоемкости почвы в зависимости от влагосодержания: 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – глина; а, в – экстремальные точки

Сопоставляя отношения объемных теплоемкостей, соответствующих влажностям, приведенным на рисунке 2, приходим к выводу, что они практически одинаковы. Тогда отношения объемных теплоемкостей и влажностей в критических точках $U_{мг}$, U_m и $U_{βm}$ есть постоянные величины, которые не зависят от степени дисперсности почвы, т.е. они являются по своему физическому смыслу критериями подобия гидротермического режима в почве. Из теории подобия известно, что отношение критериев есть также критерий подобия.

Найдем критериальные отношения:

$$\frac{C\rho_{нв}}{C\rho_{нв}} \cdot \frac{U_{нв}}{U_{мг}} = 0,30; \quad \frac{C\rho_{нв}}{C\rho_m} \cdot \frac{U_{нв}}{U_m} = 0,56;$$

$$\frac{C\rho_{нв}}{C\rho_{βm}} \cdot \frac{U_{нв}}{U_{βm}} = 0,64; \quad \frac{U_{нв}}{U_{мг}} = 3,33 \frac{C\rho_{нв}}{C\rho_{мг}};$$

$$\frac{U_{нв}}{U_m} = 1,79 \frac{C\rho_{нв}}{C\rho_m}; \quad \frac{U_{нв}}{U_{βm}} = 1,56 \frac{C\rho_{нв}}{C\rho_{βm}}.$$

Отсюда:

$$\frac{U_{нв}}{U_{мг}} = 3,33 \frac{C_0\rho_0 + C_{жс}U_{нв}\rho_0}{C_0\rho_0 + C_{жс}U_{мг}\rho_0} = \frac{C_0 + C_{жс}U_{нв}}{C_0 + C_{жс}U_{мг}}; \quad (1)$$

$$\frac{U_{нв}}{U_m} = 1,79 \frac{C_0 + C_{жс}U_{нв}}{C_0 + C_{жс}U_m}; \quad (2)$$

$$\frac{U_{нв}}{U_{βm}} = 1,56 \frac{C_0 + C_{жс}U_{нв}}{C_0 + C_{жс}U_{βm}}. \quad (3)$$

Величины C_0 , ρ_0 ($\rho_0 = \rho$) и $U_{нв}$ в уравнениях (1-3) могут быть определены экспе-

риментально. На основании этих значений по критериальным уравнениям легко найти критические влажности $U_{мг}$, U_m и $U_{βm}$. При этом влажность $U_{βm}$ (соответствующая максимуму температуропроводности) является гидрологической постоянной в почвах разного гранулометрического состава или граничной точкой перехода от одной формы связи влаги с твердой фазой почвы к другой. Таким образом, уравнения (1-3) позволяют определить границы влажностей, соответствующих различным состояниям влаги в почве, или гидрологические константы.

В связи с тем, что в зависимости от степени влагосодержания меняется энергия связи влаги с твердым почвенным скелетом, можно заключить, что в различных диапазонах увлажнения преобладает определенный, в зависимости от гранулометрического состава, механизм влияния влаги на теплоемкость почвы. В этом заложена одна из основ структурно-функциональной (энергетической) концепции теплофизического состояния почвы.

Для количественного анализа отмеченного влияния сопоставим отношения объемной теплоемкости влаги, поглощенной почвой, к объемной теплоемкости влажной почвы при полной влагоемкости:

$$\alpha = \frac{C_{жс}U\rho}{C_0\rho + C_{жс}U_{нв}\rho}$$

с безразмерным симплексом $\varphi = \frac{U\rho_{жс}}{U_{нв}\rho}$

(табл.).

Таблица
Безразмерная теплоемкость a (числитель)
в зависимости от безразмерного симплекса φ
(знаменатель) при различных
гидрологических константах

Степень дисперсности	$U_{мг}$	U_m	$U_{\rho m}$	$U_{пв}$
Песок	0,075 0,065	0,211 0,183	0,258 0,224	0,633 0,549
Супесь	0,084 0,066	0,220 0,174	0,290 0,229	0,781 0,661
Суглинок	0,124 0,095	0,274 0,210	0,347 0,266	0,877 0,672
Глина	0,179 0,140	0,303 0,237	0,380 0,297	0,862 0,673

Аппроксимируя их, найдем:

$$\frac{C_{жс}}{C_0 + C_{жс} U_{пв}} = 0,76 \frac{\rho_{жс}}{\rho U_{пв}}$$

или
$$C_0 = \frac{C_{жс} U_{пв} (\rho - 0,76 \rho_{жс})}{0,76 \rho_{жс}}, \quad (4)$$

где $C_{жс} = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, $\rho_{жс} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

С учетом $U_{пв} = (\Pi \cdot \rho_{жс})/\rho$ и $\Pi = (d - \rho)/d$, где Π – порозность почвы (% от объема), d – плотность твердой фазы ($\text{кг}/\text{м}^3$), а также подставляя известные величины, получим выражение для объемной теплоемкости C_{ρ_0} в системе СГС:

$$C_{\rho_0} = \frac{(\rho - 0,76)(d - \rho)}{0,76d}, \quad (5)$$

в системе СИ:

$$C_{\rho_0} = \frac{5513(\rho - 760)(d - \rho)}{d}. \quad (6)$$

При проведении сопряженных гидрофизических исследований и при отсутствии данных по плотности твердой фазы C_{ρ_0} можно найти с учетом параметра θ_s модели ван-Генухтена (СГС):

$$C_{\rho_0} = \frac{\theta_s (\rho - 0,76)}{0,76}, \quad (7)$$

СИ:
$$C_{\rho_0} = 5513 \cdot \theta_s (\rho - 760). \quad (8)$$

Полученные формулы позволяют быстро определить удельную и объемную теплоемкости почвы. Для этого необходимо знать ее плотность сложения и полную влагоемкость (ρ и $U_{пв}$ соответственно). При этом отпадает необходимость проведения сложных и дорогостоящих экспериментов.

Заключение

Экспериментальная база данных по теплофизическим свойствам почв Алтайского края не позволяет оперативно определять теплоемкость, тепло- и температуропроводность почвенного покрова в полевых условиях. Поэтому нами были разработаны многофункциональные зависимости тепло- и температуропроводности от степени дисперсности, плотности почвы и количества органического вещества, содержащегося в почвенном профиле.

Для оперативного определения теплоемкости почвы нами был также разработан экспресс-метод, основанный на использовании теории подобия и критериальных взаимосвязях. Полученные математические модели позволяют быстро находить весь комплекс теплофизических коэффициентов.

Библиографический список

1. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. – М.: Гостехиздат, 1976. – 352 с.
2. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. – М.: Колос, 1972. – 359 с.
3. Макарычев С.В., Мазиров М.А. Теплофизика почв: методы и свойства. – Суздаль: Изд-во Владимирского НИИСХ, 1996. – Т. 1. – 230 с.
4. Лунин А.И., Макарычев С.В. Использование импульсных методов в сельскохозяйственном производстве для определения теплоемкости почв // Тр. Алтайского СХИ. – Барнаул, 1977. – Вып. 28. – С. 135-138.
5. Серых Г.М. Прибор для экспрессного измерения теплофизических характеристик неметаллических материалов // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 2. – С. 229-231.
6. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
7. Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове: автореф. дис. ... докт. биол. наук. – М., 2008. – 50 с.

References

1. Chudnovskii A.F. Teplofizika pochv. – M.: Gostekhizdat, 1976. – 352 s.
2. Dimo V.N. Teplovoi rezhim pochv SSSR. – M.: Kolos, 1972. – 359 s.
3. Makarychev S.V., Mazirov M.A. Teplofizika pochv: metody i svoistva. – Suzdal': Izd-vo Vladimirskogo NIISKH, 1996. – T. 1. – 230 s.

4. Lunin A.I., Makarychev S.V. Ispol'zovanie impul'snykh metodov v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve dlya opredeleniya teploemkosti pochv. – Barnaul, 1977. – Tr. Altaiskogo SKhl. – Вып. 28. – S. 135-138.

5. Serykh G.M. Pribor dlya ekspressnogo izmereniya teplofizicheskikh kharakteristik nemetallicheskih materialov // Pribory i

tekhnika eksperimenta. – 1982. – № 2. – S. 229-231.

6. Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – M.: Izdvo MGU, 2005. – 432 s.

7. Arkhangel'skaya T.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya temperatury pochv v kompleksnom pochvennom pokrove: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. – M., 2008. – 50 s.



УДК 631.423.2

С.В. Бабошкина, А.В. Пузанов, О.А. Ельчинова,
Т.А. Рождественская, И.А. Трошкова
S.V. Baboshkina, A.V. Puzanov, O.A. Yelchinina,
T.A. Rozhdestvenskaya, I.A. Troshkova

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИПОЧВЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ
В ЧЕРНОЗЕМАХ ОБЫКНОВЕННЫХ
УЙМОНСКОЙ МЕЖГОРНОЙ КОТЛОВИНЫ (БАССЕЙН Р. КАТУНЬ)
В УСЛОВИЯХ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО НАСЫЩЕНИЯ ПОЧВЫ ВЛАГОЙ**

**MODELING OF MOISTURE SUBSURFACE VERTICAL MOVEMENT IN ORDINARY CHERNOZEMS
OF THE UYMON INTERMOUNTAINE DEPRESSION (THE KATUN RIVER BASIN)
UNDER INITIAL MOISTURE SATURATION**

Ключевые слова: чернозем обыкновенный, Уймонская межгорная котловина, бассейн р. Катунь, почвенная влага, основная гидрофизическая характеристика, RETC, функция Ван-Генухтена, HYDRUS-1D, динамика влажности, нисходящий поток влаги.

Исследованы основные физические и гидрофизические свойства черноземов обыкновенных, используемых под посевы овса и сенокос в Уймонской межгорной котловине Алтая (бассейн р. Чендек, левый приток р. Катунь). С помощью системы компьютерного моделирования влагопереноса в почвах HYDRUS-1D в исследуемых черноземах описан процесс вертикального нисходящего перемещения влаги в ситуации, возникающей после таяния снега, паводка продолжительных дождевых осадков (из первоначально насыщенной влагой почвенной толщи). Для информационного обеспечения модели полуэмпирическим расчетным методом педотрансферных функций в программе RETC, используя экспериментальные данные гранулометрического состава, плотности, наименьшей влагоемкости и влажности завядания, получены основные гидрофизические характеристики (ОГХ) образцов гумусовых и минеральных горизонтов исследуемых почв. Выявлено, что ОГХ, построенные по методу Воронина, для черноземов легкого гранулометрического состава в области капиллярной и пленочно-капиллярной влаги дают заниженные значения влажности, а в области насыщения – завышенные, по сравнению с ОГХ, построенных без использования почвенно-гидрологических констант; возможно, для изученных черноземов (с увеличенной, в результате распашки, скважностью) в качестве параметра

максимальной влажности (Q_s) следует принимать не общую их пористость, а полную (предельную полевую) влагоемкость. Впервые на количественном уровне с использованием компьютерного моделирования показано влияние типа сельскохозяйственного использования на интенсивность и характер вертикального нисходящего потока влаги в почвах Уймонской степи. Отмечено, что в условиях начальной достаточной увлажненности потери влаги больше в Ап горизонте пашни, чем в Ад горизонте чернозема под сенокосом, что указывает на возможность менее нарушенных почв (несмотря на их более легкий гранулометрический состав) лучше переносить засушливые периоды.

Key words: chernozem, Uymon intermontane depression, the Katun River basin, soil moisture, water retention curve (WRC), RETC software, van Genuchten function, HYDRUS-1D software, moisture dynamics, moisture downflow.

The physical and hydrophysical properties of ordinary chernozems used as cropland and grassland in the Uymon intermontane depression of the Altai Mountains (the Chendek River basin, the left-bank tributary of the Katun River) were studied. By means of the HYDRUS-1D software for soil moisture transfer computer modeling, the vertical descending moisture transfer in the studied chernozems was described in the situations arising after melting of snow and floods caused by steady rains (moisture transfer from initially saturated soil layer) was described. For data support of the model, the basic hydrophysical characteristics (WRC) of the samples of humus and mineral horizons of the studied soils were obtained. The