

АГРОЭКОЛОГИЯ

УДК 631.423.2

А.Г. Болотов
A.G. Bolotov

РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВЫ

THE CALCULATION OF SOIL MOISTURE RETENTION ENERGY

Ключевые слова: гидрофизические свойства почв, кривая водоудерживания почв, основная гидрофизическая характеристика, энергия водоудерживания почв.

Keywords: soil hydro-physical properties, soil moisture retention curve, principal hydro-physical characteristic, soil moisture retention energy.

Для количественной оценки эколого-физического состояния почв используется показатель интегральной энергии водоудерживания, численно равный площади под кривой основной гидрофизической характеристики (ОГХ) в фиксированном диапазоне влажностей. Физический смысл этого показателя соответствует удельной энергии со стороны твердой фазы по удержанию влаги в выбранном диапазоне. Рассмотрены наиболее распространенные в гидрофизике почв аппроксимационные зависимости ОГХ Брукса-Кори и ван-Генухтена. Также получено аналитическое выражение интеграла для функции Брукса-Кори, т.к. для функции ван-Генухтена это решение затруднительно, и даже при некотором упрощении конечное выражение получается слишком громоздким и неудобным в использовании. Приведен пример расчета по полученной формуле интегральной энергии водоудерживания чернозема обыкновенного. Параметры, использованные в качестве входных характеристик, были получены в результате аппроксимации экспериментальных значений кривой водоудерживания. Выявлено, что в результате агрогенеза энергия водоудерживания верхнего гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема обыкновенного легкосуглинистого, расположенного в умеренно засушливой степи Алтайского края, уменьшилась в два раза.

To give quantitative evaluation of environmental and physical condition of soils, the index of integral moisture retention energy is used which is numerically equal to the area under the curve of the principal hydro-physical characteristic in a fixed range of moisture content. The physical meaning of this index corresponds to the specific energy on the part of solid phase for moisture retention in the selected range. This paper reviews the most widespread in soil hydrophysics approximation dependences of the principal hydro-physical characteristic by Brooks-Corey and van Genuchten. Also, an analytic expression of the integral for the Brooks-Corey function is derived, because the solution is difficult for the van Genuchten function, and even with some simplification, the final expression is too cumbersome and inconvenient to use. An example of the calculation of the integral moisture retention energy for ordinary chernozem from the derived formula is presented. The parameters used as input characteristics were obtained by the approximation of the experimental values of moisture retention curve. It was found that due to agrogenic processes the moisture retention energy of the upper humus-accumulative horizon of ordinary light-loamy chernozem located in the temperately-arid steppe of the Altai Region decreased twofold.

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

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

Введение

Для количественной оценки состояния почвенного покрова используются различные интегральные показатели. Так, для Алтайского Приобья произведена агроэкологическая оценка плодородия пахотных почв на основе подхода, устанавливающего динамичность изменений параметров плодородия [1]. Для количественной оценки эколого-физического

состояния почв в работах [2, 3] предложен показатель интегральной энергии водоудерживания, численно равный площади под кривой основной гидрофизической характеристики (ОГХ) в фиксированном диапазоне влажностей. Данную величину определяют непосредственно по кривым водоудерживания методом геометрического интегрирования, что вызывает определенные трудности и ог-

раничивает дальнейшее развитие использования этой информативной величины.

Цель работы – получение аналитического выражения для расчета энергии водоудерживания почвы. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**: 1) анализ существующих аппроксимационных функций кривой водоудерживания; 2) решение интеграла аппроксимационной функции кривой водоудерживания. **Объект исследований** – водоудерживающая способность почвы; **предмет** – аппроксимационная функция кривой водоудерживания.

Результаты исследований

В результате многочисленных исследований было выявлено, что на гидрофизические характеристики почвы наибольшее влияние оказывают: плотность почвы, содержание гумуса и распределение гранулометрических фракций по размеру [4]. Наряду с чисто эмпирическими методами появлялись физически обоснованные подходы к расчету дифференциальной пористости из размера и формы, слагающих почву частиц. Поэтому в настоящее время одновременно развиваются несколько направлений получения гидрофизических характеристик по физическим свойствам почвы. Однако наиболее широкое распространение получили методы расчета параметров аппроксимационных зависимостей гидрофизических свойств, из которых наиболее точными являются аппроксимационные зависимости ОГХ Брукса-Кори [5]:

$$S_e = \begin{cases} (\alpha P)^{-\lambda} & (\alpha P > 1) \\ 1 & (\alpha P \leq 1) \end{cases} \quad (1)$$

и ван Генухтена [6]:

$$S_e = [1 + (\alpha P)^n]^{-m} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

где S_e – степень насыщения почвы ($0 \leq S_e \leq 1$);

θ – объемная влажность почвы, $см^3/см^3$;

θ_r – параметр минимальной влажности, соответствующий прочносвязанной, неподвижной для вязкого течения влаги, $см^3/см^3$;

θ_s – объемная влажность почвы, соответствующая полному влагонасыщению, $см^3/см^3$;

P – капиллярно-сорбционное давление почвенной влаги, эквивалентное матричному потенциалу ψ_c , $см в д.ст.$;

α и n – эмпирические коэффициенты, характеризующие наклон ОГХ и зависящие от дисперсности и плотности сложения образца.

Параметр α – величина обратная давлению (потенциала) барботирования P_b ($\alpha = 1/P_b$), являющаяся критическим состоянием увлажнения, выше которого наблюдается угнетение растений [7].

При известной ОГХ можно получить интегральную работу $\int_{\theta_r}^{\theta} \psi_c \Delta \theta$, отражающей физическое состояние почвы. Данную величину определяют непосредственно по кривым водоудерживания методом геометрического интегрирования [8]:

$$A_{\theta_r-\theta} = \int_{\theta_r}^{\theta} \psi_c \Delta \theta \quad (3)$$

А.В. Смагиным этот показатель назван интегральной энергией водоудерживания, численно равной площади под кривой ОГХ в фиксированном диапазоне влажностей [2, 3]. Физический смысл показателя следует из его размерности $Дж/кг$ и соответствует удельной энергии со стороны твердой фазы по удержанию влаги в выбранном диапазоне. Нахождение данной величины производится численным методом трапеций с реализацией в виде макроса Excel (автор М.В. Глаголев). В качестве нижнего предела интегрирования выбрана полная влагоемкость, а верхнего – условная минимальная величина влажности при унифицированном абсолютном значении матричного потенциала (давления) $\psi = 1000 Дж/кг$ [3].

Получено аналитическое выражение интеграла (3) для функции Брукса-Кори, т.к. для функции ван-Генухтена это решение затруднительно, и даже при $m = 1$ конечное выражение получается слишком громоздким и неудобным в использовании.

Найдем полную работу по удалению влаги в произвольно выбранном диапазоне влагосодержания, ограниченном θ_r и θ_s . Для этого из уравнения (1)

$$S_e = \left(\frac{P_b}{P}\right)^\lambda; \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r},$$

выразим P :

$$P = P_b \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r}\right)^{\lambda^{-1}}$$

или с учетом уравнения связи параметра (λ) Брукса-Кори и параметра (n) ван-Генухтена [9]:

$$\frac{1}{1-n} = \lambda + 1$$

получим:

$$P = P_b \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{(1-n)n^{-1}}$$

Полная работа по удалению влаги в диапазоне влагосодержания от θ_1 до θ_2 :

$$A_{\theta_1, \theta_2} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} P d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} P_b \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{(1-n)n^{-1}} d\theta =$$

$$= P_b (\theta_2 - \theta_r) \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_2 - \theta_r} \right)^{(1-n)n^{-1}} \cdot \left(2 - \frac{1}{n} \right)^{-1} -$$

$$- P_b (\theta_1 - \theta_r) \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_1 - \theta_r} \right)^{(1-n)n^{-1}} \cdot \left(2 - \frac{1}{n} \right)^{-1},$$

$$E_1 = P_b (\theta_1 - \theta_r) \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_1 - \theta_r} \right)^{(1-n)n^{-1}} \cdot \left(2 - \frac{1}{n} \right)^{-1}$$

где

$$E_2 = P_b (\theta_2 - \theta_r) \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_2 - \theta_r} \right)^{(1-n)n^{-1}} \cdot \left(2 - \frac{1}{n} \right)^{-1},$$

энергии водоудерживания при влагосодержании θ_1 и θ_2 соответственно.

Окончательное выражение интегральной работы по удалению влаги:

$$A_{\theta_1, \theta_2} = P_b (\theta_s - \theta_r)^{(1-n)n^{-1}} \left(\frac{\theta_2 - \theta_r}{(\theta_2 - \theta_r)^{(1-n)n^{-1}}} - \frac{\theta_1 - \theta_r}{(\theta_1 - \theta_r)^{(1-n)n^{-1}}} \right) \left(2 - \frac{1}{n} \right)^{-1} \quad (4)$$

Полная работа по удалению влаги в диапазоне влагосодержания от θ_r до θ_s для параметров ван-Генухтена:

$$A_{\theta_r, \theta_s} = E_{\theta_r, \theta_s} = \frac{P_b (\theta_s - \theta_r)}{2 - (1/n)}; \quad (5)$$

для параметров Брукса-Кори:

$$A_{\theta_r, \theta_s} = E_{\theta_r, \theta_s} = \frac{P_b (\theta_s - \theta_r)}{1 - (1/\lambda)}. \quad (6)$$

Для примера рассмотрим интегральную энергию водоудерживания чернозема обыкновенного, рассчитанную по формуле (5) с учетом эквивалентности капиллярно-сорбционного давления и матричного потенциала. Параметры ван-Генухтена были получены в результате аппроксимации экспериментальных значений кривой водоудерживания.

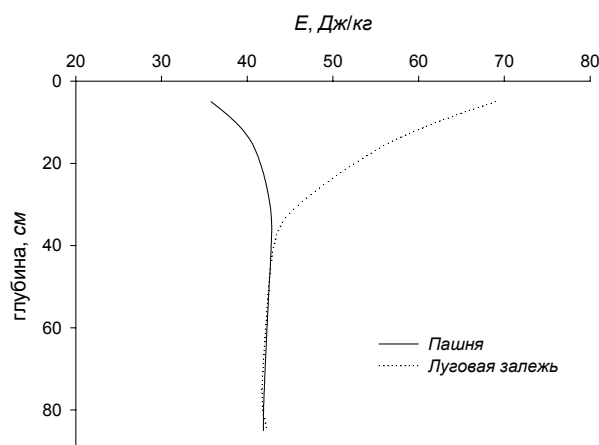


Рис. Профильное распределение интегральной энергии водоудерживания чернозема обыкновенного легкосуглинистого. Подзона умеренно засушливой степи Алтайского края

Из приведенного рисунка видно, что в результате агрогенеза энергия водоудерживания верхнего гумусово-аккумулятивного горизонта уменьшилась в два раза.

Выводы

1. Для получения аналитического выражения интегральной энергии водоудерживания наиболее подходящей является аппроксимационная функция Брукса-Кори.
2. Получено выражение интегральной энергии водоудерживания, которое рекомендуется использовать при сравнительном анализе физического состояния различных почв в любом диапазоне влажности.

Библиографический список

1. Кудрявцев А.Е., Кудрявцева Н.Ф. Агроэкологическая оценка плодородия пахотных почв колючей степи Алтайского Приобья // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 10. – С. 6-9.
2. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Мизури Маауиа Бен-Али. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение. – 1998. – № 11. – С. 1362-1370.
3. Смагин А.В., Садовникова Н.Б. Влияние сильнонабухающих полимерных гидрогелей на физическое состояние почв легкого гранулометрического состава. – М.: МАКС-Пресс, 2009. – С. 208.
4. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
5. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic Properties of Porous Media // Hydrology Papers. – Civil Engineering Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado. – 1964. – № 3. – 37 p.

6. van Genuchten M.Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1980. – Vol. 44 (5). – P. 892-898.

7. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 428 с.

8. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во МГУ, 1984.

9. Assouline S., Tavares-Filho J., Tessier D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1997. – Vol. 61. – P. 390-398.

References

1. Kudryavtsev A.E., Kudryavtseva N.F. Agroekologicheskaya otsenka plodorodiya pakhotnykh pochv kolochnoi stepi Altaiskogo Priob'ya // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2013. – № 10. – S. 6-9.

2. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Mizuri Maauia Ben-Ali. Opredelenie osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristiki pochv metodom tsentrifugirovaniya // Pochvovedenie. – 1998. – № 11. – S. 1362-1370.

3. Smagin A.V., Sadovnikova N.B. Vliyanie sil'nonabukhayushchikh polimernykh gidrogelei na fizicheskoe sostoyanie pochv legkogo granulometricheskogo sostava. – М.: MAKSPress, 2009. – S. 208.

4. Shein E.V. Kurs fiziki pochv. – М.: Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.

5. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic Properties of Porous Media // Hydrology Papers. – Civil Engineering Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado. – 1964. – № 3. – 37 pp.

6. van Genuchten M.Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1980. – Vol. 44 (5). – P. 892-898.

7. Globus A.M. Pochvenno-gidrofizicheskoe obespechenie agroekologicheskikh matematicheskikh modelei. – Л.: Gidrometeoizdat, 1987. – 428 s.

8. Voronin A.D. Strukturno-funktsional'naya gidrofizika pochv. – М.: Izd-vo MGU, 1984.

9. Assouline S., Tavares-Filho J., Tessier D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1997. – Vol. 61. – P. 390-398.



УДК 636:631.416.9 (571.15)

С.Ф. Спицына, А.А. Томаровский, Г.В. Оствальд
S.F. Spitsyna, A.A. Tomarovskiy, G.V. Ostwald

ПРОЯВЛЕНИЕ СИНЕРГИЗМА И АНТАГОНИЗМА МЕЖДУ ИОНАМИ МЕДИ, ЦИНКА И МАРГАНЦА ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ ИХ В РАСТЕНИЯ

SYNERGISM AND ANTAGONISM OF COPPER, ZINC AND MANGANESE IONS AT THEIR UPTAKE BY PLANTS

Ключевые слова: элементы-конкуренты, синергизм и антагонизм между ионами, валовое содержание элементов в почве, марганец, медь, цинк, микроэлементы, удобрения.

Изучены взаимодействия между элементами при поступлении их в растения в конкретных условиях, что дает возможность установить факт недостаточности для растений и кормов элемента не только в связи с низким его содержанием в почве, но и в связи с антагонистическим воздействием на него других ионов-конкурентов. При сопоставлении сопряженных данных о содержании пар элементов в растениях Алтайского края установлена криволинейная зависимость между их содержанием в растениях. Прямая зависимость (синергизм) между содержанием в растениях элементов-конкурентов наблюдается при содержании каждого в растениях: меди < 8 мг/кг; цинка < 40; марганца < 100 мг/кг; обратная зависимость (антагонизм) между содержанием в растениях эле-

ментов-конкурентов наблюдается при содержании в растениях меди > 8 мг/кг; марганца > 100 мг/кг. Антагонизм между ионами и уменьшение содержания элементов в растениях проявляются при валовом содержании элементов-конкурентов в почве: марганца > 1000 мг/кг; цинка > 80 мг/кг; меди > 35 мг/кг. Полученные результаты дают возможность правильного подбора удобрений, содержащих микроэлементы, исключая применение тех элементов, которые при определенных обстоятельствах могут быть антагонистами по отношению к биологически важным элементам.

Keywords: competitor elements, synergism and antagonism of ions, total element content in soil, manganese, copper, zinc, trace elements, fertilizers.

The interaction between the elements at their uptake by plants under specific conditions is studied;