

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Агрофизический научно-исследовательский институт»  
Российский фонд фундаментальных исследований

---

## **МАТЕРИАЛЫ**

**Всероссийской научной конференции**

**с международным участием**

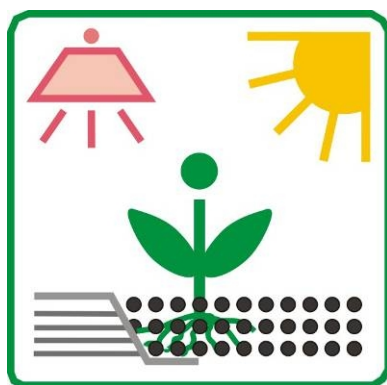
**«АГРОЭКОСИСТЕМЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ И**

**РЕГУЛИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ:**

**ОТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ К ПРАКТИКЕ**

**ПРЕЦИЗИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ»**

**Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2016 г.**



Санкт-Петербург  
2016

УДК 631.95:51-76:631.588

ББК 41.4:28.08

А 26

**Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления».** Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2016 г. – СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. – 508 с.

Материалы даны в авторской редакции

*Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований*

**Ответственные за выпуск:**

*Блохина С. Ю.*

*Агеенкова О. А.*

*Цивилев А. Ю.*

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ КАК КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СРЕДЫ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

В. В. Терлеев

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
(ФГАОУ ВО СПбПУ)*

К числу достоинств математических моделей, описывающих гидрофизические свойства почвы, относится возможность количественной оценки показателей, характеризующих указанные свойства, при отсутствии данных прямых измерений. Данное утверждение можно доказать на примере такого гидрофизического свойства, как водоудерживающая способность почвы. Указанное свойство принято описывать в виде зависимости объемной влажности почвы  $\theta$  ( $\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ ) от капиллярного давления (капиллярно-сорбционного потенциала) почвенной влаги  $\psi$  ( $\text{см H}_2\text{O}$ ). Данная зависимость  $\theta(\psi)$  называется основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) почвы (Глобус, 1969).

К числу характерных особенностей водоудерживающей способности почвы относится явление гистерезиса. По причине гистерезиса одному и тому же значению  $\psi$  соответствует бесконечное множество значений  $\theta$ , которые могут существенно отличаться в зависимости от «предыстории» увлажнения-иссушения почвы. Вместе с тем, определение  $\theta$  при заданном  $\psi$  представляет собой весьма актуальную задачу, например при расчете норм орошения. На практике данный расчет сводится к определению потенциального запаса продуктивной влаги в почве. Как известно, такой запас определяется разностью двух почвенно-гидрологических констант (ПГК), а именно «наименьшей влагоемкости» (НВ – значение  $\theta$  при  $pF \approx 2,5$ ) и «влажности устойчивого завядания» (ВЗ – значение  $\theta$  при  $pF \approx 4,2$ ). Численные значения данных ПГК устанавливаются, как правило, путем прямых измерений главной ветви иссушения  $\theta(\psi)$ . В практическом ирригационном земледелии агрономы стремятся не допустить высыхания почвы до значения ВЗ, которое приводит к гибели растений. Поэтому поливы проводятся при несколько более влажной

почве, а нормы орошения рассчитываются по разности НВ и контролируемой предполивной влажности почвы. В качестве допустимой нижней границы  $\theta$  принимается ПГК, которая называется «влажностью разрыва капиллярной связи влаги в почве» (ВРК – значение  $\theta$  при  $rF \approx 3,48$ ). Выбор ВРК объясняется тем, что данный показатель характеризует переход влаги из категории легкодоступной в категорию труднодоступной для растений. Значение ВРК также определяется по главной ветви иссушения ОГХ.

Норма орошения должна быть выражена в единицах объема (массы) воды. Если предполивная объемная влажность почвы равна  $\theta_{in}$ , то объем поливной воды в расчете на один  $см^3$  почвы  $V$  вычисляется по формуле:  $V = НВ - \theta_{in}$ . Но такой, по всей видимости, очевидный подход приводит к завышению норм орошения и, как следствие, к непроизводительным потерям поливной воды. Докажем данное утверждение.

Известно, что для заданного  $rF$  любое значение  $\theta$  на главной ветви иссушения ОГХ превышает все соответствующие значения объемной влажности почвы на других ветвях петли гистерезисной  $\theta(\psi)$ . В частности, для  $rF \approx 2.5$  показатель НВ, который характеризует  $\theta$  на главной ветви иссушения ОГХ, является максимальным из всех возможных значений  $\theta$  на остальных кривых петли гистерезисной  $\theta(\psi)$ . Кроме того, если сравнивать ветви гистерезисной ОГХ по значениям показателя  $rF$ , которые соответствуют  $\theta = НВ$ , то максимальное значение данного показателя относится к главной ветви иссушения. Следовательно, применение нормы  $V = НВ - \theta_{in}$  приведет к тому, что по ветви увлажнения почва «придет» в состояние, характеризуемое  $rF$ , который окажется меньше показателя, соответствующего измеренной НВ. Это означает, что образуется избыток свободной влаги, который почва не способна удержать и который стекает под действием силы тяжести за пределы расчетного слоя почвы. Также следует отметить, что в данном случае помимо непроизводительных потерь поливной воды происходят такие нежелательные явления, как вымывание питательных веществ из корнеобитаемой зоны почвы.

Явление гистерезиса водоудерживающей способности почвы известно практикам-мелиораторам. Однако учесть его в расчетах норм орошения с

использованием данных прямых измерений ОГХ не представляется возможным. Причина заключается в следующем. Предположим, для почвы, на которой возделывается орошаемая культура, измерена главная ветвь иссушения ОГХ, определены НВ и показатель  $rF$ , соответствующий данной ПГК. Допустим, что исходя из особенностей физиологии культивируемых растений определено максимальное пороговое значение  $rF$  (например, при ВРК), и от указанного значения до  $rF$  при НВ измерена первичная ветвь увлажнения ОГХ. При наличии таких данных можно было бы осуществлять полив по фиксированным циклам в соответствии с точно определенными нормами орошения. Однако в условиях сельскохозяйственного поля такой «идеальный» сценарий, весьма вероятно, будет нарушен атмосферными осадками. При этом почва может «пойти» по такой ветви увлажнения, данные по которой отсутствуют; затем указанная ветвь увлажнения сменится ветвью иссушения, которая может не совпадать с главной ветвью иссушения гистерезисной ОГХ. Интенсивность атмосферных осадков и сроки их выпадения в разные вегетационные периоды могут существенно отличаться, а измерить все многообразие «конфигураций» петли гистерезисной ОГХ, очевидно, не представляется возможным.

Учет явления гистерезиса в расчетах норм орошения возможен только при помощи физически адекватных математических моделей. Разумеется, параметры таких моделей должны быть идентифицируемы по доступным данным прямых измерений  $\theta(\psi)$ , например по данным о главной ветви иссушения и одной первичной ветви увлажнения гистерезисной ОГХ. В исследовании (Терлеев и др., 2013а, 2014, 2015) представлено описание модели водоудерживающей способности почвы. Для параметров данной модели предложена физико-статистическая интерпретация (Терлеев и др., 2012). Разработанная в АФИ компьютерная программа Hysteresis позволяет проводить вычислительные эксперименты с математической моделью гистерезисной  $\theta(\psi)$  (Терлеев и др., 2013b).

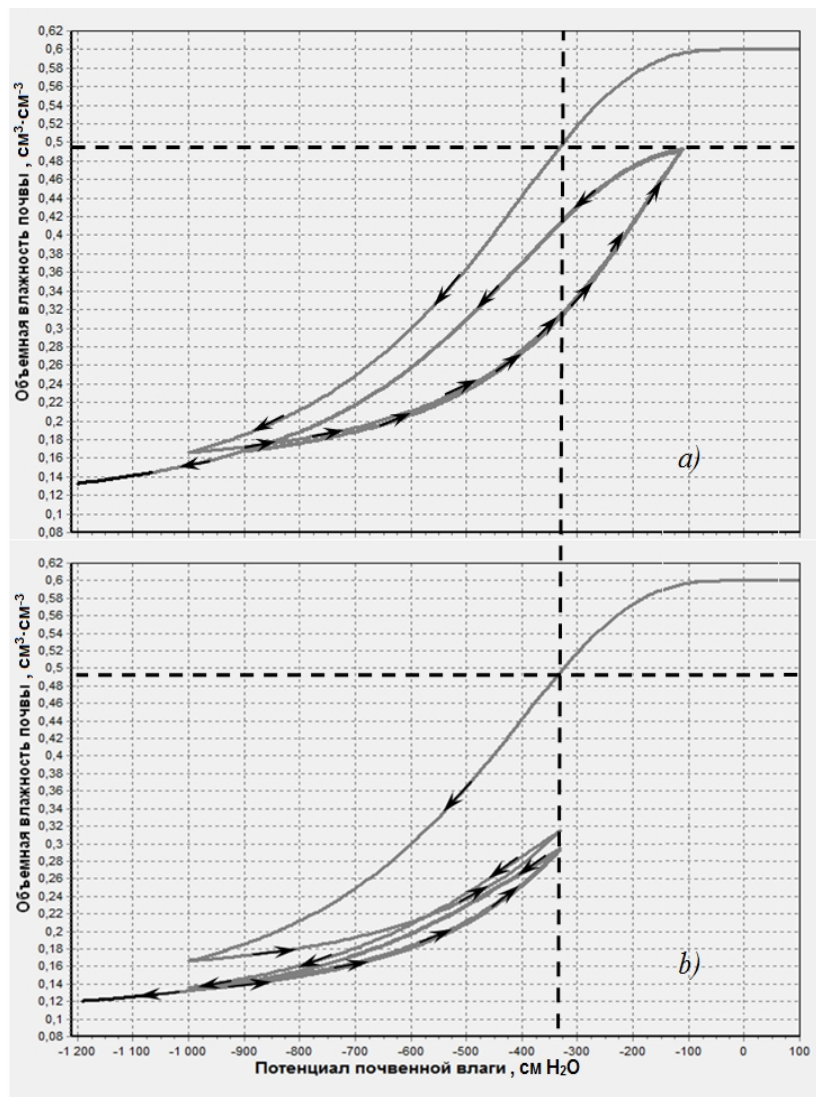


Рис. 1. Пример *a)*: два цикла «иссушение-увлажнение» почвы с поливом от ВРК до НВ, которые определены по «классической» кривой ОГХ (без учета гистерезиса); пример *b)*: два цикла «иссушения-увлажнения» почвы с поливом от  $\psi$ , которому соответствует ВРК, до  $\psi$ , которому соответствует НВ, с учетом гистерезисной ОГХ.

На рисунке представлены два примера расчета норм орошения. Заданы характерные для суглинистой почвы ПГК: НВ =  $0,495 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$  при  $\psi = -330 \text{ см H}_2\text{O}$ ; ВРК =  $0,165 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$  при  $\psi = -1000 \text{ см H}_2\text{O}$ ; параметры модели:  $n_d = 2,8$ ;  $n_w = 2,8$ ;  $\theta_s = 0,6 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ ;  $\theta_r = 0,1 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ ;  $\psi_{ae} = -20 \text{ см H}_2\text{O}$ ;  $\psi_{we} = 150 \text{ см H}_2\text{O}$ ;  $\alpha_d = 0,0020 \text{ см H}_2\text{O}^{-1}$ ;  $\alpha_w = 0,0025 \text{ см H}_2\text{O}^{-1}$ . В примере *a)* после первого полива свободная влага стекает за пределы расчетного слоя, а  $\psi$  принимает значение  $-330 \text{ см H}_2\text{O}$ , которому соответствует «новая» НВ =  $0,415 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ . Потеря воды составляет  $0,495 - 0,415 = 0,08 \text{ (см}^3 \cdot \text{см}^{-3}\text{)}$ . В примере *b)* такой потери нет. Второй полив в примере *a)* начинается при  $\theta = 0,165 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ , в то время как «новая» ВРК при  $\psi = -1000 \text{ см H}_2\text{O}$  теперь

составляет  $0,135 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ . Второй полив в примере *b*) начинается при  $\theta = 0,135 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ . Влажность почвы в результате полива принимает значение  $0,270 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$  при  $\Psi = -330 \text{ см H}_2\text{O}$ . В данном случае дополнительно используется легкодоступная влага, запас которой характеризуется разностью  $0,165 - 0,135 = 0,03 \text{ (см}^3 \cdot \text{см}^{-3})$ . При этом вся поливная влага используется без потерь. Нормы второго и последующих поливов в примере *b*) ниже, чем в примере *a*) в 2,44 раза  $((0,495 - 0,165)/(0,270 - 0,135) = 2,44)$ . Кроме того, в примере *b*) вся поливная влага расходуется без потерь, а в примере *a*) она используется лишь на 75,8%  $((0,415 - 0,165)/(0,495 - 0,165) \times 100 = 75,8)$ . При увлажнении 30-сантиметрового почвенного слоя для повышения влажности почвы (с приведенными показателями) от значения  $\theta = 0,165 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$  до значения  $\theta = 0,495 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$  непроизводительная потеря поливной воды может достигать  $240 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$  в каждом поливе.

Работа выполнена при поддержке DAAD, DFG и РФФИ № 16-04-01473-а.

### Список литературы

1. Глобус А.М. 1969. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеиздат. 356 с.
2. Терлеев В.В., Топаж А.Г., Миршель В., Гурин П.Д. 2013а. Моделирование главных ветвей иссушения и увлажнения петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы // *Агрофизика*. № 1. С. 22–29.
3. Терлеев В.В., Топаж А.Г., Миршель В., Гурин П.Д. 2014. Моделирование водоудерживающей способности почвы на основе представлений о капиллярном гистерезисе и логнормальном распределении пор по размерам: теория // *Агрофизика*. № 1. С. 9–19.
4. Терлеев В.В., Топаж А.Г., Миршель В. 2015. Уточненная оценка эффективных запасов продуктивной влаги с учетом гистерезиса водоудерживающей способности почвы // *Метеорология и гидрология*. № 4. С. 79–89.
5. Терлеев В.В., Mirschel W., Баденко В.Л., Гусева И.Ю., Гурин П.Д. 2012. Физико-статистическая интерпретация параметров функции водоудерживающей способности почвы // *Агрофизика*. № 4. С. 1–8.
6. Терлеев В.В., Топаж А.Г., Гурин П.Д. 2013b. Программа «Hysteresis» для расчета сорбционных и десорбционных ветвей петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы // *Материалы науч. сессии по итогам 2012 г. СПб., АФИ*. С. 161–166.

ISBN 978-5-905200-32-8



Материалы Всероссийской научной конференции  
(с международным участием)  
**«Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от  
теоретической модели к практике прецизионного управления»**  
Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2016 г.

Редактор: О. А. Агеенкова

Технический редактор: А. Ю. Цивилев

---

Подписано в печать 23.11.2016.

---

Подготовлено к печати в ФГБНУ АФИ  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14.