

УДК [631.43+004.65]

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛАВНЫХ ВЕТВЕЙ ИССУШЕНИЯ И УВЛАЖНЕНИЯ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВЫ

В. В. Терлеев<sup>1</sup>, А. Г. Топаж<sup>2</sup>, В. Миршель<sup>3</sup>, П. Д. Гурин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия 195251

<sup>2</sup>ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии  
Гражданский пр-т, 14, Санкт-Петербург, Россия, 195220

<sup>3</sup>Лейбниц-Центр Агрландшафтных исследований (ZALF),

Эберсвальдер штрассе, Мюнхеберг, Германия, 15374

E-mail: Vitaly\_Terleev@mail.ru

Поступила в редакцию 15 февраля 2013 г., принята к печати 12 марта 2013 г.

Построена математическая модель, описывающая главные ветви иссушения и увлажнения петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы. Предложена интерпретация параметров построенной модели в рамках представлений о почве как о капиллярно-пористом теле, получены адекватные оценки данных параметров с использованием статистик логнормального распределения эффективных радиусов пор и физических показателей почвы.

**Ключевые слова:** дифференциальная влагоемкость почвы, водоудерживающая способность почвы, капиллярность, гистерезис, логнормальное распределение эффективных радиусов почвенных пор.

### ВВЕДЕНИЕ

Расчеты влагопереноса в почве осуществляются с использованием величины капиллярного давления почвенной влаги  $\psi$  в качестве зависимой переменной уравнения Ричардса. Однако натурное измерение данной величины является весьма трудоемким. Поэтому для проверки точности таких расчетов обычно применяется более доступная в измерении величина объемной влажности почвы  $\theta$ , с которой и сравнивают результаты вычислений (Полуэктов и др., 2003).

Кроме того, расчеты норм поливов сельскохозяйственных культур основаны на прогнозах влагозапаса почвы, которые также определяются значениями  $\theta$ . Таким образом, для прогнозирования влагозапаса почвы с использованием уравнения Ричардса требуется выявить зависимость между величинами  $\psi$  и  $\theta$ . Напомним, что зависимость  $\theta(\psi)$  описывает водоудерживающую способность почвы, которая называется основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) (Глобус, 1969) и является по определению первообразной функции дифференциальной влагоемкости почвы (Полуэктов, Терлеев, 2002, 2005). В отсутствие данных натурных измерений попарно сопряженных величин  $\psi$  и  $\theta$

используются косвенные методы оценки зависимости  $\theta(\psi)$  (Terleev *et al.*, 2010). Вместе с тем следует отметить, что подобные оценки являются в значительной мере условными, поскольку однозначный пересчет значений  $\psi$  в значения  $\theta$  осуществить невозможно вследствие известного явления гистерезиса водоудерживающей способности почвы.

По существу, ОГХ является изотермой состояния почвенной влаги в условиях равенства нулю равнодействующей всех сил, обусловленных абиотическим взаимодействием молекул воды с твердой, жидкой и газообразной фазами почвы. По причине необратимости термодинамических процессов результаты установления сорбционного и десорбционного равновесий воды в почве отличаются между собой: им соответствуют разные изотермы почвенной влаги. Поэтому принято различать сорбционные и десорбционные ветви ОГХ. Ветвь, образованная множеством точек, графически изображающих совокупность последовательных равновесных состояний влаги при увлажнении изначально абсолютно сухой почвы, называется главной ветвью увлажнения водоудерживающей способности почвы (или главной

сорбционной ветвью *ОГХ*). А ветвь, образованная множеством точек, графически изображающих совокупность последовательных равновесных состояний влаги при иссушении изначально полностью влагонасыщенной почвы, называется главной ветвью иссушения водоудерживающей способности почвы (или главной десорбционной ветвью *ОГХ*). Две указанные ветви образуют т.н. главную петлю гистерезиса водоудерживающей способности почвы.

Для корректного пересчета значений  $\psi$ , полученных в качестве решения Ричардса, в искомые значения  $\theta$  необходимо определить, на какой ветви *ОГХ* находится точка, характеризующая соответствующее состояние почвенной влаги. Для определения актуальной ветви *ОГХ* требуется вести тщательный учет всех явлений сорбции и десорбции воды, начиная с момента, когда почва начинает высыхать после состояния насыщения талыми водами. Наряду с указанным необходимо учитывать все атмосферные осадки, а в условиях орошаемого земледелия каждый полив. Открытым остается вопрос учета конденсации влаги в почвенных капиллярах при выпадении росы.

Таким образом, данное исследование является актуальным для задач определения гидрофизических свойств почв при мелиоративных изысканиях (Арефьев и др., 2011), эколого-экономической оценки агро-мелиоративных систем при их планировании и реконструкции (Арефьев и др., 2012), а также для комплексной агрофизической диагностики почвы при разработке и использовании имитационно-экспертных систем поддержки агротехнологических решений (Якушев и др., 2008а, 2008б; Баденко и др., 2011; Терлеев и др., 2012а). Наряду с вышеперечисленным необходимо отметить важность исследования гидрофизических свойств почв для развития теории обмена, переноса и поглощения питательных веществ в корнеобитаемом слое почвы (Терлеев и др., 2000; Терлеев, 2001), а также для повышения точности расчетов доз минеральных и органических удобрений (Полуэктов, Терлеев, 2010).

Целью данного исследования является теоретическое обоснование и математическая формализация явления гистерезиса

водоудерживающей способности почвы в виде функций, описывающих главные десорбционную и сорбционную ветви *ОГХ*.

## МЕТОД

К числу широко применяемых аппроксимаций *ОГХ*, которые описывают водоудерживающую способность почв, не набухающих при увлажнении, относится модель:

$$\bar{\theta} = 1 / \left( 1 + (-\alpha\psi)^n \right)^m, \quad (1)$$

где  $\bar{\theta} = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$  - приведенная объемная влажность почвы,  $\theta_s$  - объемная влажность полного насыщения почвы влагой,  $\theta_r$  - минимальный удельный объем жидкой воды в почве,  $\alpha$  и  $n$  - эмпирические параметры.

К бесспорным достоинствам модели (1) относятся: во-первых, простое описание зависимости влажности почвы от капиллярного давления почвенной влаги и, во-вторых, высокая точность интерполяции экспериментальных данных. При  $m = 1 - 1/n$  модель (1) представляет собой аппроксимацию *ОГХ*, предложенную Ван Генухтенем (Van Genuchten, 1980). При  $m = 1$  (как отмечает Ван Генухтен) данная модель ничем не отличается от *ОГХ* (Ahuja, Swartzendruber, 1972; Haverkamp *et al.*, 1977). Здесь следует добавить, что в случае  $m = 1$  и  $\theta_r = 0$  модель (1) представляет собой еще более раннюю аппроксимацию *ОГХ* (Brutsaert, 1966). В данной статье рассматривается подход к модификации модели (1) для учета гистерезиса водоудерживающей способности почвы в форме главных ветвей иссушений и увлажнения. Далее будем полагать  $m = 1$ , поскольку именно в указанном случае параметры *ОГХ*  $\alpha$  и  $n$  имеют физико-статистическую интерпретацию (Гурин, Терлеев, 2012).

Ранее в рамках концепции системы цилиндрических пор кругового поперечного сечения, эквивалентной по своим капиллярным свойствам реальному поровому пространству почвы, было дано теоретическое обоснование функции дифференциальной влагоемкости почвы и первообразной данной функции в виде *ОГХ*. В описании распределения объемов почвенных пор использована модель случайной логарифмически нормальной величины – эффективного радиуса

поры (D'Hollander, 1979; Kosugi, 1996; Kosugi, Норманс, 1998; Kosugi, 1999).

Для теоретически обоснованных функций водоудерживающей способности и дифференциальной влагоемкости почвы были

предложены соответствующие аппроксимации. Данные гидрофизические функции и их аппроксимации описываются следующими формулами (Терлеев и др., 2012б):

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\theta} = (1/2)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\sqrt{\pi}}{4}\ln(-\alpha(\psi - \psi_a))\right), \\ \bar{\theta} \approx \left(1 + (-\alpha(\psi - \psi_a))^n\right)^{-1}, \\ d\bar{\theta}/d\psi = -(\psi - \psi_a)^{-1}(n/4)\exp\left(-\pi(n/4)^2 \ln^2(-\alpha(\psi - \psi_a))\right), \\ d\bar{\theta}/d\psi \approx \alpha n(-\alpha(\psi - \psi_a))^{n-1} \left(1 + (-\alpha(\psi - \psi_a))^n\right)^{-2}, \\ \psi < \psi_a; \\ \bar{\theta} = 1, \quad d\bar{\theta}/d\psi = 0, \\ \psi \geq \psi_a. \end{array} \right. \quad (2)$$

Отметим, что при  $m = 1$  и  $\psi_a = 0$  аппроксимации ОГХ (1) и (2) совпадают. Для параметров гидрофизических функций, описываемых системой соотношений (2), была предложена физико-статистическая интерпретация:  $\alpha$  - это величина, прямо пропорциональная наиболее вероятному эффективному радиусу пор и зависящая от капиллярных свойств почвы;  $n$  - это величина, обратно пропорциональная стандартному отклонению логарифмов эффективных радиусов пор. При этом были получены оценки указанных параметров:  $\alpha = r_0 g \rho_w / (2\gamma \cos \varphi)$  и  $n = 4 / (\sigma \sqrt{2\pi})$ , где  $r_0$  - наиболее вероятный эффективный радиус пор,  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение логарифмов эффективных радиусов пор,  $\gamma$  - коэффициент поверхностного натяжения воды на границе с воздухом,  $\varphi$  - краевой угол смачивания почвенных частиц,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\rho_w$  - плотность воды (Терлеев и др., 2012б). Данный подход к теоретическому обоснованию гидрофизических функций почвы (в том числе ОГХ) не ограничен какими-либо условиями и, в общем, должен соответствовать и десорбционным, и сорбционным изотермическим равновесиям влаги в почвенных капиллярах. Можно предположить, что форма и положение изотерм почвенной влаги, которые соответствуют десорбционным и сорбционным равновесным состояниям воды в почве, будут отличаться. Рассмотрим причины указанного отличия в рамках принятых здесь представлений.

Во-первых, для изотерм десорбции и сорбции почвенной влаги отношение  $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$  только теоретически равно единице, когда под плоской поверхностью влаги значение капиллярного давления воды равно нулю, а соответствующее абсолютное давление влаги равно атмосферному давлению. В реальности наблюдаются иные явления.

При физическом моделировании иссушения почвы с помощью пневматического пресса вытеснение воды из нее достигается воздействием избыточного давления атмосферных газов над исходно насыщенным влагой (без заземленного воздуха в порах) почвенным образцом, который помещен на пористую мембрану. С увеличением газового давления  $P_g > 0$  (см вод. ст.) над поверхностью воды в почвенных порах от нормального внешнего атмосферного давления  $P_a$  до значения  $P_{ae}$  происходит растворение в воде атмосферного воздуха, однако содержание воды в поровом пространстве практически не изменяется и влажность почвы принимает значение, равное пористости. Избыточное газовое давление передается воде, абсолютное давление которой также повышается. По достижении избытка давления атмосферных газов значения  $\Delta P_{ae} = P_{ae} - P_a$  сила взаимодействия между молекулами воды и поверхностью почвенных частиц ослабевает настолько, что часть воды переходит в категорию свободной гравитационной влаги и стекает из почвы через мембрану в поддон, а освободившийся объем пор занимает воздух.

Значение  $\Delta P_{ae}$  называется давлением входа воздуха, или давлением барботирования (барботирование - это пропускание пузырьков газа через жидкость под давлением). Избытку газового давления в пневматическом прессе относительно внешнего атмосферного давления соответствует значение капиллярного давления почвенной влаги  $\psi_{ae} = -\Delta P_{ae} \leq 0$ . Величина  $\psi$  может достигнуть близкого к  $\psi_{ae}$  значения, например, путем устранения избытка газового давления в прессе в момент начала входа первого пузырька воздуха в удерживаемую почвой воду с последующим достижением равновесного состояния почвенной влаги при нормальном давлении окружающей атмосферы. При вытеснении очередных порций воды из порового пространства с последующим устранением избытка газового давления над внешним атмосферным давлением происходит дальнейшее уменьшение радиуса кривизны поверхности границы раздела «вода-воздух» и соответственное понижение капиллярного давления почвенной влаги  $\psi = -(P_g - P_a)$ .

Увлажнение исходно воздушно-сухой почвы обычно сопровождается задержкой в тупиковых порах заземленного воздуха в виде воздушных пробок, что обусловлено особой геометрией порового пространства почвы. При этом влажность равновесного состояния почвы оказывается меньше влажности почвы десорбционного равновесия для одинаковых значений давления влаги. Вытеснение газовых пузырьков из почвенной влаги может наблюдаться, например, при создании дополнительного (положительно-го) гидравлического напора  $\Delta P_{we}$  (см вод. ст.), который называется давлением входа воды. Данному напору соответствует значение капиллярного давления почвенной влаги  $\psi_{we} = \Delta P_{we}$  ( $\psi_{ae} \leq \psi_{we}$ ). Если при нулевом значении  $\Delta P_{we}$  в почвенной влаге остаются пузырьки заземленного воздуха, то влажность насыщения почвы водой оказывается меньше пористости почвы (разность значений указанных величин соответствует объему заземленного воздуха). С удалением заземленного воздуха величина влажности достигает значения

пористости почвы. В природе выделение атмосферных газов из почвенной влаги, а также их растворение в воде и скопление в ней в виде пузырьков возможны со сменой барических систем атмосферы, а дополнительное гидравлическое давление может появиться в результате образования слоя свободной влаги на поверхности почвы при обильных осадках в виде дождя, при поливах, а также при подъеме грунтовых вод над точкой наблюдения.

Во-вторых, в литературе имеются представления, согласно которым десорбционный и сорбционный краевые углы смачивания водой поверхности почвенных частиц в изотермических условиях могут отличаться. При десорбции влаги искривленная поверхность раздела «вода-воздух» граничит с тонкой пленкой влаги, адсорбированной стенками почвенных капилляров; в данном случае краевой угол смачивания должен быть близок к нулю. При сорбции указанная поверхность касается сухой поверхности почвенных частиц, которая может оказаться в большей степени гидрофобной, чем поверхность, покрытая тонкой пленкой влаги; в данном случае краевой угол смачивания должен быть существенно больше нуля. Можно согласиться с такими представлениями о физике явления для случая неравновесных краевых углов смачивания (Шейн, 2005). Однако в равновесных условиях десорбционный и сорбционный краевые углы смачивания должны быть одинаковыми. Иной подход требует объяснений и доказательств, которые в литературе пока не представлены. Поэтому вторая причина не может рассматриваться в качестве фактора, который обуславливает отличия между десорбционной и сорбционной ветвями ОГХ почвы.

В-третьих, как известно, радиус почвенных капилляров не является постоянным по своей длине, т.е. почвенные капилляры напоминают четки. В таком случае для системы почвенных капилляров характерен т.н. эффект чернильницы. Это проявляется в том, что при одинаковом капиллярном давлении объем влаги в опорожняемых почвенных порах будет всегда больше, чем объем влаги в заполняемых влагой порах.

Напомним, что в данном исследовании в качестве основы моделирования водоудерживающей способности почвы принято представление о системе цилиндрических пор, эффективные радиусы которых распределены по логнормальному закону и однозначно определяют значения капиллярного давления почвенной влаги. Выявленные в натуральных экспериментах сорбционно-десорбционные различия в объемах содержащейся в порах воды при одном и том же капиллярном давлении почвенной влаги являются весомым аргументом для определенного усложнения такого представления. По указанной причине концепцию нормального распределения эффективных радиусов почвенных пор предлагается дополнить положением о том, что для сорбционного и десорбционного равновесий почвенной влаги соответствующие статистики распределения пор по размерам принимают различные значения. В частности, доля узких пор при десорбционном равновесии будет больше, чем доля пор такого же эффективного радиуса при сорбционном равновесии; кроме того, наиболее вероятный эффективный радиус пор в случае десорбционного равновесия будет меньше, чем в случае сорбционного равновесия. Отмеченный эффект можно рассматривать как вторую причину гистерезиса ОГХ. Вопрос о воз-

можном неравенстве дисперсий пока остается дискуссионным.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разумеется, список перечисленных причин вряд ли можно считать исчерпывающим. Здесь учитываются только две причины гистерезиса ОГХ, указанные выше. Далее параметры гидрофизических функций почвы и их аппроксимации для описания иссушения и увлажнения будут отмечены индексами «d» и «w», соответственно.

Из вышеизложенного следует, что должно выполняться неравенство  $\alpha_d < \alpha_w$ . Учитывая отмеченные особенности начального десорбционного равновесия исходно полностью влагонасыщенной почвы и завершающего сорбционного равновесия исходно воздушно-сухой почвы и принимая во внимание различия между значениями наиболее вероятного радиуса почвенных пор при капиллярном иссушении почвы и при ее увлажнении, модифицируем формулы (2). В результате получим две системы соотношений, описывающих две ветви зависимости между величинами объемной влажности почвы и капиллярного давления почвенной влаги при опорожнении пор от воды, начиная с самых широких капилляров и заканчивая самыми узкими, а также при заполнении пор водой, начиная с самых узких капилляров и заканчивая самыми широкими.

Первая система имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\theta} = (1/2)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\sqrt{\pi}}{4}\right)\ln(-\alpha_d(\psi - \psi_{ae})), \\ \bar{\theta} \approx \left(1 + (-\alpha_d(\psi - \psi_{ae}))^n\right)^{-1}, \\ d\bar{\theta}/d\psi = -(\psi - \psi_{ae})^{-1}(n/4)\exp\left(-\pi(n/4)^2 \ln^2(-\alpha_d(\psi - \psi_{ae}))\right), \\ d\bar{\theta}/d\psi \approx \alpha_d n (-\alpha_d(\psi - \psi_{ae}))^{n-1} \left(1 + (-\alpha_d(\psi - \psi_{ae}))^n\right)^{-2}, \\ \psi < \psi_{ae}; \\ \bar{\theta} = 1, \quad d\bar{\theta}/d\psi = 0, \\ \psi \geq \psi_{ae}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Вторая система имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\theta} = (1/2)\operatorname{erfc}\left((n\sqrt{\pi}/4)\ln(-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))\right), \\ \bar{\theta} \approx \left(1 + (-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))^n\right)^{-1}, \\ d\bar{\theta}/d\psi = -(\psi - \psi_{we})^{-1}(n/4)\exp\left(-\pi(n/4)^2 \ln^2(-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))\right), \\ d\bar{\theta}/d\psi \approx \alpha_w n (-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))^{n-1} \left(1 + (-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))^n\right)^{-2}, \\ \psi < \psi_{we}; \\ \bar{\theta} = 1, \quad d\bar{\theta}/d\psi = 0, \\ \psi \geq \psi_{we}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Таким образом, получены формулы (3) и (4), которые описывают две ветви главной петли гистерезиса ОГХ, образованные: а) совокупностью точек, характеризующих изотермические десорбционные равновесия воды в диапазоне от влагонасыщенного состояния почвы (при отсутствии в ней заземленного воздуха) до воздушно-сухого состояния почвы; б) совокупностью точек, характеризующих изотермические сорбционные равновесия воды в диапазоне от воздушно-сухого состояния почвой до ее полного насыщения влагой с вытеснением пузырьков заземленного воздуха.

Ранее было установлено, что точность аппроксимации теоретически обоснованных функций дифференциальной влагоемкости и водоудерживающей способности почвы достаточно высока. Поэтому в практическом отношении более предпочтительным является использование аппроксимации ОГХ в классе элементарных функций. Тем не менее было отмечено и то, что использование аппроксимации дифференциальной влагоемкости почвы в качестве соответствующего коэффициента уравнения Ричардса может приводить к накоплению погрешности при использовании численных методов и итерационных процедур. Поэтому в отношении дифференциальной влагоемкости почвы было предложено использовать функцию, полученную непосредственно из логнормального распределения эффективных ради-

усов почвенных пор и закона Лапласа (Терлеев и др., 2012б).

В качестве примера на рисунке представлены главная петля гистерезиса ОГХ, а также функции дифференциальной влагоемкости почвы, соответствующие главным десорбционной и сорбционной ветвям петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы. На данном рисунке главная десорбционная ветвь  $\bar{\theta} = \left(1 + (-\alpha_d(\psi - \psi_{ae}))^n\right)^{-1}$  изображена сплошной кривой (1); главная сорбционная ветвь  $\bar{\theta} = \left(1 + (-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))^n\right)^{-1}$  изображена сплошной кривой (2); функция дифференциальной влагоемкости почвы

$$\begin{aligned} d\bar{\theta}/d\psi &= -(n/4)(\psi - \psi_{ae})^{-1} \\ &\exp\left(-\pi(n/4)^2 \ln^2(-\alpha_d(\psi - \psi_{ae}))\right), \end{aligned}$$

соответствующая главной ветви иссушения ОГХ, изображена штрихованной кривой (3); функция дифференциальной влагоемкости почвы

$$\begin{aligned} d\bar{\theta}/d\psi &= -(n/4)(\psi - \psi_{we})^{-1} \\ &\exp\left(-\pi(n/4)^2 \ln^2(-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))\right), \end{aligned}$$

соответствующая главной ветви увлажнения ОГХ, изображена штрихованной кривой (4). При построении графиков на рисунке использованы следующие параметры:  $n = 2.5$ ,  $\psi_{ae} = -100$  см вод. ст.,  $\psi_{we} = 100$  см вод. ст.,  $\alpha_d = 0.0033$  см вод. ст.<sup>-1</sup>,  $\alpha_w = 0.0040$  см вод. ст.<sup>-1</sup>.

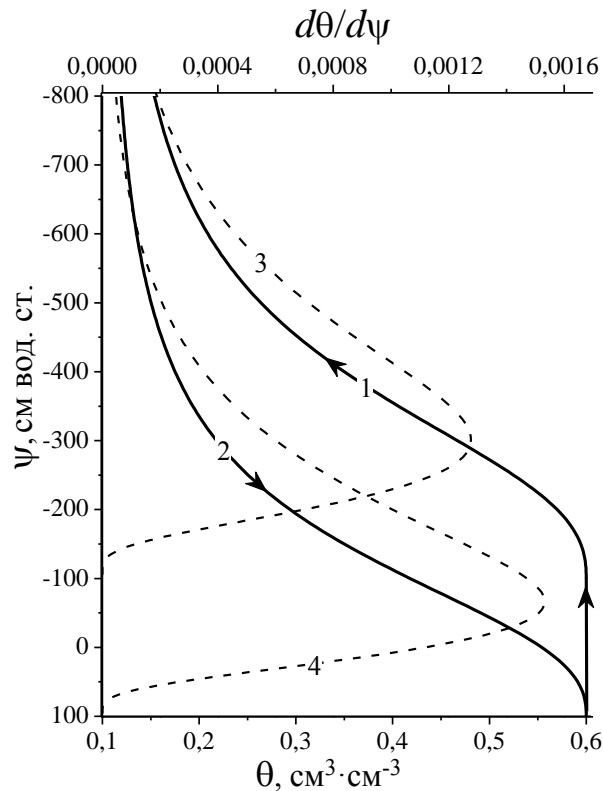


Рис. Главная петля гистерезиса ОГХ и функция дифференциальной влагоемкости почвы (пояснения в тексте)

Здесь следует отметить, что описание явления гистерезиса водоудерживающей способности почвы не исчерпывается представлением главных ветвей иссушения и увлажнения ОГХ. Кроме того, предложенное функциональное представление указанных ветвей нуждается в экспериментальной проверке. Авторы намерены разработать и представить в будущих публикациях математическую модель гистерезиса водоудерживающей способности почвы в виде функций, описывающих семейства первичных, вторичных и т.д. ветвей наряду с главными ветвями гистерезиса ОГХ, а также апробировать указанную модель на независимых экспериментальных данных в сравнении с существующими аналогами.

**ВЫВОДЫ**

1) Построена математическая модель гистерезиса водоудерживающей способности почвы, не набухающей при увлажнении, в виде функционального представления главных ветвей иссушения и увлажнения ОГХ, а также дифференциальной влагоемкости почвы.

2) Для параметров построенной модели предложена интерпретация в рамках пред-

ставлений о почве как о капиллярно-пористом теле с использованием следующих понятий: об эффективных радиусах почвенных пор, распределенных по логнормальному закону; о капиллярном давлении почвенной влаги, подчиняющемся закону Лапласа; о защемленном в тупиковых порах воздухе, давлении входа воздуха и давлении входа воды; о поверхностном натяжении воды на границе раздела фаз и др.

3) Значения интерпретированных параметров оценены с использованием показателей капиллярности и статистик логнормального распределения эффективных радиусов почвенных пор.

4) Графическое представление результатов моделирования главных ветвей иссушения и увлажнения водоудерживающей способности почвы позволяет заключить, что построенная модель на качественном уровне адекватна природе гистерезиса ОГХ. Для количественной оценки указанной модели (ее точности) необходимо провести сравнение с существующими аналогичными разработками, а также верификацию с использованием независимых данных натуральных измерений.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке DAAD, DFG и РФФИ № 09-05-00415-а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Глядченкова Н.А. 2011. Определение водно-физических свойств почв при мелиоративных изысканиях. Мелиорация и водное хозяйство. 2:18-21.
- Арефьев Н.В., Wenkel K.-O., Mirschel W., Баденко В.Л., Терлеев В.В., Волкова Ю.В. 2012. Комплексная оценка агро-мелиоративных систем для планирования их реконструкции. В: Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата. Международ. конф., ГНУ АФИ, Санкт-Петербург, 20-21 сентября 2012, Санкт-Петербург. С. 468-472.
- Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Муравьева Л.С. 2011. Агрофизические исследования почвы для технологий точного земледелия: постановка задачи и метод. Плодородие. 1:29-31.
- Глобус А.М. 1969. Экспериментальная гидрофизика почв. Изд. Гидрометеиздат, Ленинград.
- Гурин П.Д., Терлеев В.В. 2012. Моделирование водоудерживающей способности почвы с учетом гистерезиса. В: Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата. Международ. конф., ГНУ АФИ, Санкт-Петербург, 20-21 сентября 2012, Санкт-Петербург. С. 497-501.
- Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. 2002. Моделирование водоудерживающей способности и дифференциальной влагоемкости почвы. Метеорология и гидрология. 11:93-100.
- Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Терлеев В.В. 2003. Три способа расчета динамики почвенной влаги. Метеорология и гидрология. 11:90-98.
- Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. 2005. Моделирование водоудерживающей способности почвы с использованием агрогидрологических характеристик. Метеорология и гидрология. 12:98-103.
- Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. 2010. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы. Агрохимия. 10:68-74.
- Терлеев В.В., Кокотов Ю.А., Крейер К.Г., Федотов М.В. 2000. Исследование обменного калия в дерново-подзолистой супесчаной почве методом Бекетта. Агрохимия. 9:29-35.
- Терлеев В.В. 2001. Моделирование обмена, переноса и поглощения фосфора и калия в корнеобитаемом слое почвы. Автореферат диссертации на соискание степени доктора сельскохозяйственных наук. ГНУ АФИ. Санкт-Петербург. 40 с.
- Терлеев В.В., Полуэктов Р.А., Бакаленко Б.И. 2012а. Структура информационного обеспечения модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Агрофизика. 2:29-36.
- Терлеев В.В., Mirschel W., Баденко В.Л., Гусева И.Ю., Гурин П.Д. 2012б. Физико-статистическая интерпретация параметров функции водоудерживающей способности почвы Агрофизика. 4:1-8.
- Шейн Е.В. Курс физики почв: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
- Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Петрова М.В., Терлеев В.В., Петрушин А.Ф., Бакаленко Б.И. 2008а. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (концепция). Вестник РАСХН. 5:7-9.
- Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Петрова М.В., Терлеев В.В., Петрушин А.Ф., Бакаленко Б.И. 2008б. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (реализация). Вестник РАСХН. 6:6-9.
- Ahuja L.R., Swartzendruber D. 1972. An improved form of soil-water diffusivity function. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36: 9-14.
- Brutsaert W. 1966. Probability laws for pore-size distribution. Soil Sci. 101: 85-92.
- D'Hollander E.H. 1979. Estimation of the pore size distribution from the moisture characteristic. Water Resour. Res. 15:107-112.
- Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P.J., Vachaud G. 1977. A comparison of numerical simulation model for one-dimensional infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J. 41:285-294.
- Kosugi K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resour. Res. 32:2697-2703.
- Kosugi, K., and J.W. Hopmans. 1998. Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 1496-1505.
- Kosugi K. 1999. General model for unsaturated hydraulic conductivity for soil with lognormal pore-size distribution. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:270-277.
- Terleev V.V., Mirschel W., Schindler U., Wenkel K.-O. 2010. Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence. International Agrophysics. 24(4):381-387.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-989.