DOI 10.33952/2542-0720-2021-2-26-244-260
УДК 631.43+004.65

Терлеев В. В.[1,2], Дунаева Е. А.[3], Гиневский Р. С.[1], Лазарев В. А.[1], Топаж А. Г. [4]

ПОЧВЕННО-ГИДРОФИЗИЧЕСКОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННОГО ИРРИГАЦИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

[1]ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;
[2] ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»;
[3]ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»;
[4]ООО «Бюро Гиперборея»

Реферат. *Актуальность исследования определена востребованностью физически адекватного математического описания взаимодействий воды в почве для построения модели динамики почвенной влаги как интеллектуального ядра ресурсосберегающих технологий прецизионного ирригационного земледелия. Цель исследований – теоретическое обоснование и математическое формулирование гидрофизических функций почвы с учетом гистерезиса. Дано описание трех систем гидрофизических функций почвы. Для верификации и сравнения систем проведены вычислительные эксперименты с использованием пакета оригинальных компьютерных программ и данных о почве «3305 Ida silt loam (>15 cm)» из авторитетного литературного источника – каталога Муалема. Методом точечной аппроксимации опытных данных о главных ветвях гистерезиса водоудерживающей способности идентифицированы параметры функций. С использованием этих параметров вычислены: (i) прогнозные оценки значений функции относительной гидравлической проводимости; (ii) сканирующие ветви гистерезиса водоудерживающей способности; а также (iii) прецизионная норма орошения. Для относительной гидравлической проводимости как функции объемной влажности почвы феномен гистерезиса не характерен. Рекомендованы к применению оригинальные функции системы № 3. Показаны преимущества предлагаемого метода расчета прецизионной нормы орошения. Достоинством каждой системы является то, что функция водоудерживающей способности и функция относительной гидравлической проводимости почвы, образующие эту систему, имеют общий набор параметров. Для рассмотренного в работе типа почв и использовании одинакового значения предполивной влажности почвы равного 179 [см^3·см$^{-3}$] как для расчета прецизионной нормы орошения, так и по «традиционному» методу, и увлажнении расчетного почвенного слоя мощностью 50 см, суммарный непроизводительный расход воды при поливной норме 555 [м^3·га$^{-1}$] может достигать 0,029 [см^3·см$^{-3}$] или 140 [м^3·га$^{-1}$] в расчетном слое. При этом при применении прецизионных норм избыток свободной влаги не образуется, что показывает дополнительные возможности не только экономии воды при орошении, особенно в засушливых регионах, но и снижения вымыва питательных элементов и агрохимикатов за пределы расчетного слоя почвы и, соответственно, уменьшении дополнительной экологической нагрузки на окружающую территорию.*

Ключевые слова: *математическая модель, водоудерживающая способность, гидравлическая проводимость, гистерезис, сканирующие ветви, точечная аппроксимация опытных данных, прогнозное оценивание, критерий Вильямса-Клута, прецизионная норма орошения.*

Для цитирования: *Терлеев В. В., Дунаева Е. А., Гиневский Р. С., Лазарев В. А., Топаж А. Г. Почвенно-гидрофизическое информационное обеспечение прецизионного ирригационного земледелия // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 2(26). С. 244–260. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-244-260.*

For citation: *Terleev V. V., Dunaieva Ie. A., Ginevsky R. S., Lazarev V. A., Topaj A. G. Soil-hydrophysical information support of precise irrigation farming // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 2(26). P. 244–260. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-244-260.*

Введение

В настоящее время по причине сокращения площади обрабатываемых угодий, деградации сельскохозяйственных земель, увеличения частоты неблагоприятных погодных условий в период вегетации, а также возрастания стоимости материальных, энергетических и информационных ресурсов обостряется проблема информационного обеспечения систем производства растениеводческой продукции. Незаменимость каждого из отмеченных видов ресурсов в равной степени очевидна, однако имеются определенные отличия в значении каждого из них. Особое место среди них занимают информационные ресурсы. Специальное предназначение этого вида ресурсов заключается в информационном обеспечении систем рекультивации земель, воспроизводстве почвенного плодородия, оптимизации производства растениеводческой продукции заданного качества, а также рационализации использования материальных и энергетических ресурсов.

В настоящее время информационные ресурсы представлены преимущественно высокими технологиями и смарт-системами, интеллектуальным ядром которых являются базы данных, математические модели и разработанные на их основе компьютерные программы. Их использование в практическом растениеводстве представляет собой комплексную систему мер по информационному обеспечению производства растениеводческой продукции с учетом экономической целесообразности и экологической допустимости.

Вследствие изменения климата практически во всех зонах земледелия отмечается интенсификация фактора неблагоприятных погодных условий. Действие этого негативного фактора заключается в резких перепадах температуры приземного слоя воздуха, в возрастании количества засушливых и избыточно влажных периодов, а также в повышении частоты чередования этих периодов. Это объясняет важность гидромелиоративных мероприятий для оптимизации водного режима корнеобитаемого слоя почвы сельскохозяйственного поля и для управления продукционным процессом агроценоза в целом.

Оптимизация водного режима корнеобитаемого слоя почвы сельскохозяйственного поля предполагает: (i) создание и поддержание наиболее благоприятных условий влагообеспечения растений и (ii) предотвращение непроизводительных потерь материальных и энергетических ресурсов, в том числе поливной воды, удобрений, мелиорантов и средств защиты растений. В ирригационном земледелии такие потери могут быть обусловлены гравитационным стоком воды за пределы зоны обитания корней. Нередко этим потерям сопутствуют загрязнение агрохимикатами природных вод и эвтрофикация водоемов, которые порождают или обостряют экологическую проблему.

В отношении точного ирригационного земледелия поиск решения задачи оптимизации влагообеспеченности агроценозов с учетом эколого-экономических требований, предъявляемых к производству растениеводческой продукции, предполагает разработку и применение эффективной системы информационной поддержки управления водным режимом корнеобитаемого слоя почвы в течение всего сезона вегетации путем оперативного прогнозирования динамики почвенной влаги и применения прецизионных норм орошения.

При наличии достоверной агрометеорологической информации за определенный период времени может быть составлен достаточно точный краткосрочный прогноз запасов влаги в корнеобитаемом слое почвы. Для решения такого класса задач используют различные разработки из семейства имитационных динамических моделей. Наиболее известной отечественной разработкой в этом семействе является система имитационного моделирования продукционного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL [1], созданная в Агрофизическом научно-исследовательском институте. В каждой имитационной динамической модели

продукционного процесса растений имеется блок (модуль) расчета динамики почвенной влаги. Точность этого расчета в значительной мере зависит от изученности гидрофизических свойств почвы – ее водоудерживающей способности и гидравлической проводимости.

Цель исследований – верификация и развитие ранее предложенного подхода к моделированию гидрофизических свойств почвы для выработки научно-обоснованных предложений по совершенствованию информационного обеспечения современных систем точного ирригационного земледелия. Указанная цель достигается решением следующих задач:

1) теоретическое описание гидрофизических свойств почвы в рамках представлений о почве как капиллярно-пористой среде с учетом гистерезиса;

2) формулирование почвенно-гидрофизических функций для использования в модели динамики почвенной влаги как интеллектуальном ядре ресурсосберегающих технологий точного ирригационного земледелия;

3) расчет прецизионной нормы орошения с использованием сканирующих ветвей гистерезиса водоудерживающей способности почвы.

Материалы и методы исследований

1. Функциональное представление гидрофизических свойств почвы для прогнозирования динамики почвенной влаги в задачах информационного обеспечения точного ирригационного земледелия.

Современное состояние исследований в области прогнозирования динамики почвенной влаги характеризуется, главным образом, поиском решения проблемы физического обоснования и математического моделирования гидрофизических свойств почвы. Впервые эта проблема возникла в связи с формулированием уравнения Ричардса [2]: она остается актуальной и в настоящий момент времени. Это уравнение описывает перенос воды в ненасыщенной влагой почве. По сути, оно формулирует условие неразрывности потока почвенной влаги и в математическом отношении представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа с переменными коэффициентами. Именно переменный характер коэффициентов порождает вышеупомянутую проблему, поскольку в данном случае уравнение не имеет аналитического решения. В настоящее время имеются достаточно эффективные программные средства, которые позволяют найти численное (приближенное) решение уравнения такого класса. Поэтому поиск решения уравнения Ричардса, в принципе, сводится к функциональному описанию входящих в это уравнение двух коэффициентов.

Первым коэффициентом уравнения Ричардса является функция дифференциальной влагоемкости почвы. Первообразная этой функции описывает (характеризует) водоудерживающую способность почвы (water-retention capacity – WRC) в форме зависимости объемной влажности почвы θ [см^3·см$^{-3}$] от капиллярного давления (капиллярно-сорбционного потенциала) почвенной влаги ψ [см H_2O]. Зависимость $\theta(\psi)$ называется функцией водоудерживающей способности почвы, или основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) почвы [3, 4]. Производная функции $\theta(\psi)$ определяется как функция дифференциальной влагоемкости почвы, поэтому зависимость $\theta(\psi)$ является функцией интегральной влагоемкости почвы. Вторым коэффициентом уравнения Ричардса является функция гидравлической проводимости почвы. Эта функция описывает зависимость коэффициента влагопроводности почвы k [см·сут$^{-1}$] от величин ψ или θ.

Современное состояние исследований в области функционального представления двух коэффициентов уравнения Ричардса характеризуется наличием нескольких десятков математических моделей водоудерживающей способности и гидравлической проводимости почвы с формальными (не имеющими физического смысла) параметрами. Большинство этих моделей аппроксимируют точечные

опытные данные $\theta(\psi)$, $k(\psi)$ или $k(\theta)$ с достаточно низкой погрешностью. При этом в литературе представлен ряд попыток подведения физической основы под ранее предложенные модели. В отношении возможности физического обоснования достаточно хорошую перспективу имеет функция водоудерживающей способности почвы, предложенная Хаверкампом и соавторами [5].

В области гидрофизики почвы позицию абсолютного лидера, начиная с 1980 г., занимают две функции, предложенные Ван Генухтеном [6]. Первая функция – WRC-VG (таблица 1) описывает водоудерживающую способность; вторая функция – RHC-MVG – отношение гидравлической проводимости почвы к коэффициенту фильтрации влаги k_s[см·сут$^{-1}$], то есть относительную гидравлическую проводимость (relative hydraulic conductivity – RHC) почвы. Функция RHC-MVG базируется на широко известной формуле Муалема [7].

Таблица 1 – Гидрофизические функции почвы

Система № 1	WRC-VG	$S_e = \begin{cases} (1+(-\alpha\psi)^n)^{-(1-1/n)}, \psi < 0; \\ 1, \psi \geq 0, \end{cases}$ где $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ - эффективное влагонасыщение почвы, θ_s [см^3·см$^{-3}$] – объемная влажность насыщения, θ_r [см^3·см$^{-3}$] – остаточная объемная влажность, α [см H_2O^{-1}] и n – формальные параметры ($n > 1$)
	RHC-MVG	$\frac{k}{k_s} = \begin{cases} \sqrt{S_e}\left(1-\left(1-S_e{}^{1/(1-1/n)}\right)^{(1-1/n)}\right)^2, \theta_r \leq \theta < \theta_s; \\ 1, \theta = \theta_s, \end{cases}$ где α [см H_2O^{-1}] и n – те же параметры, что и в функции WRC-VG
Система № 2	WRC-KT	$S_e = \begin{cases} \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{n\sqrt{\pi}}{4}\ln\left(-\alpha(\psi-\psi_e)\right)\right), \psi < \psi_e; \\ 1, \psi \geq \psi_e, \end{cases}$ где $\mathrm{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-t^2)dt$ – дополнительная функция ошибок; $\alpha = -1/(\psi_0 - \psi_e)$ [см H_2O^{-1}], ψ_e [см H_2O] – капиллярное давление «входа воздуха» для ветвей иссушения и капиллярное давление «входа воды» для ветвей увлажнения (при учете гистерезиса), ψ_0 [см H_2O] – капиллярное давление, при котором плотность распределения вероятностей по значениям случайной величины $-\ln\left((\psi-\psi_e)/(\psi_0-\psi_e)\right)$ с нулевым генеральным средним и стандартным отклонением σ достигает максимума ($\psi_0 < \psi_e$); $n = 4/\left(\sigma\sqrt{2\pi}\right)$
	RHC-MKT	$\frac{k}{k_s} = \begin{cases} \frac{\sqrt{S_e}}{4}\left(\mathrm{erfc}\left(\mathrm{inverfc}(2S_e) + \frac{2}{n\sqrt{\pi}}\right)\right)^2, \theta_r \leq \theta < \theta_s; \\ 1, \theta = \theta_s, \end{cases}$ где $\mathrm{inverfc}\left(\mathrm{erfc}(x)\right) = x$; параметры те же, что и в функции WRC-KT
Система № 3	WRC-HT	$S_e = \begin{cases} \left(1+\left(-\alpha(\psi-\psi_e)\right)^n\right)^{-1}, \psi < \psi_e; \\ 1, \psi \geq \psi_e. \end{cases}$ Параметры имеют ту же интерпретацию, что и параметры функции WRC-KT
	RHC-MT	$\frac{k}{k_s} = \begin{cases} \sqrt{S_e}\left(1-\left(1-S_e{}^{-1}\right)\exp\left(\frac{8}{n\pi}\right)\right)^{-2}, \theta_r \leq \theta < \theta_s; \\ 1, \theta = \theta_s. \end{cases}$ Параметры имеют ту же интерпретацию, что и параметры функции WRC-HT.

Неоспоримым достоинством функций Ван Генухтена является то, что обе функции имеют общий набор параметров. Это достоинство является особенно существенным, поскольку прямые измерения гидрофизических свойств почвы отличаются высокой трудоемкостью. При этом функция водоудерживающей способности достаточно точно аппроксимирует данные прямых измерений. Параметры этой функции, идентифицированные методом точечной аппроксимации опытных данных, используются при прогнозировании значений функции относительной гидравлической проводимости. При этом достигается приемлемая точность для почв с достаточно однородной текстурой (гранулометрический состав характеризуется относительно слабой дифференциацией почвенных частиц по размерам). Иными словами, в абсолютном большинстве исследований в области прогнозирования динамики почвенной влаги и моделирования продукционного процесса агроценозов применяются почвенно-гидрофизические функции, предложенные Ван Генухтеном [6]. Способ расчета $k(\theta)/k_s$ по формуле Муалема [7] с использованием функции WRC-VG называется методом Муалема-Ван Генухтена.

Анализ современной литературы показывает, что исследования в области моделирования гидрофизических свойств почвы активно и продуктивно развиваются. Примеры такого развития представлены, например, в [8–10]. Для описания водоудерживающей способности в статье [8] используется функция WRC-KT. При $\psi_e = 0$ функция WRC-KT в виде частного случая сводится к модели, разработанной Косуги [11]. Для WRC-KT в статье [8] предлагается непрерывная аппроксимация в классе элементарных функций (WRC-HT). Параметры этой аппроксимации имеют ту же интерпретацию, что и параметры функции WRC-KT. При $\psi_e = 0$ функция WRC-HT в виде частного случая сводится к функции, предложенной Хаверкампом и соавторами [5]. Для описания относительной гидравлической проводимости $k(\theta)/k_s$ в статье [8] предлагается функция RHC-MKT. При $\psi_e = 0$ функция RHC-MKT в виде частного случая сводится к модели, разработанной Косуги [11]. Для RHC-MKT в статье [8] предлагается непрерывная аппроксимация в классе элементарных функций (RHC-MT, см. таблицу 1).

Перечисленные функции обычно используют попарно, поэтому в таблице 1 они объединены в три системы функций. Так как прямые измерения гидрофизических свойств почвы являются весьма трудоемкими, то для идентификации параметров функций, представленных в таблице 1, обычно используют данные наименее трудоемкого измерения одного из этих свойств, а именно водоудерживающей способности. Идентификацию осуществляют методом точечной аппроксимации данных прямого измерения зависимости $\theta(\psi)$.

Система № 1 применяется в расчетах динамики почвенной влаги весьма широко уже в течение нескольких десятков лет и остается лидером в использовании при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур в настоящее время. При больших значениях экспоненциального параметра n метод Муалема-Ван Генухтена позволяет получить достаточно низкую погрешность оценки $k(\theta)/k_s$ с использованием параметров, которые идентифицированы путем точечной аппроксимации данных $\theta(\psi)$. Но существует проблема малых значений n, при которых метод приводит к сомнительным результатам. Например, для почвы «1006 Beit Netofa clay» экспоненциальный параметр n систем № 2 и № 3 не превышает единицу, в отличие от системы № 1, для которой, напомним, действует ограничение $n > 1$. В статье [8] показано, что системы № 2 и № 3 для этой почвы имеют существенно более низкую погрешность по сравнению с системой № 1. К настоящему времени уже выявлены преимущества систем № 2 и № 3 над системой № 1, когда во всех трех системах экспоненциальный параметр n превышает единицу. Для многих почв (из литературных источников) при значениях экспоненциального

параметра $n > 1$ для всех трех систем погрешности систем № 2 и № 3 в отношении оценок $k(\theta)/k_s$ являются существенно более низкими или соизмеримыми с погрешностями системы № 1 (при том, что их погрешности в отношении точечной аппроксимации $\theta(\psi)$ во многих случаях соизмеримы с погрешностями системы № 1). В отличие от системы № 1 параметры систем № 2 и № 3 имеют физико-статистическую интерпретацию, поэтому использование систем № 2 и № 3 в гидрофизических расчетах представляется более предпочтительным. Если сравнивать между собой системы № 2 и № 3, то можно отметить определенное отличие, которое состоит в том, что систему № 3 образуют математические соотношения, которые относятся к классу элементарных функций.

2. Математическое моделирование гистерезиса водоудерживающей способности почвы для расчета прецизионных норм орошения как теоретический базис разработки ресурсосберегающих технологий точного ирригационного земледелия.

В ирригационном земледелии в течение многих лет одной из основных проблем было отсутствие способа расчета нормы орошения, наиболее точно соответствующей максимальному количеству воды, которое почва способна удержать в корнеобитаемом слое. Эта проблема остается нерешенной до конца и в настоящее время. Поэтому практикуется орошение по норме, при которой почва должна увлажняться до наименьшей влагоемкости (НВ). В основу расчета такой («традиционной») нормы орошения положена формула Костякова [13] для разности НВ и предполивной влажности почвы. НВ нередко принимают за 70–80 % от полной влагоемкости, а полив рекомендуется начинать при предполивной влажности почвы, соответствующей 70–80 % от НВ. Используемые в данном («традиционном») методе показатели почвы являются относительно легкодоступными. Показатель НВ может быть определен в полевых условиях, например, по методике заливных площадок. Нередко применяется и нормативная (весьма приближенная) оценка, по которой НВ принимается равной значению объемной влажности почвы θ [см^3·см$^{-3}$] на главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы при отрицательном значении капиллярного давления влаги $\psi_{\text{НВ}}$ [см H_2O], равном – 330 см H_2O. Объемная влажность почвы, соответствующая такому значению $\psi_{\text{НВ}}$ на главной ветви иссушения, называется «нормативной» НВ. Один из недостатков «традиционного» метода состоит в том, что расчет нормы орошения опирается на данные о главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы. Этот недостаток становится совершенно очевидным, если учитывать, что для водоудерживающей способности характерен феномен гистерезиса, при этом ветви иссушения и ветви увлажнения не совпадают. Разумеется, что при увлажнении почвы смена состояний почвенной влаги характеризуется не главной ветвью иссушения, а соответствующими сканирующими ветвями увлажнения гистерезиса водоудерживающей способности. Поэтому при «традиционной» норме орошения состоянию почвенной влаги непосредственно после полива соответствует отрицательное значение капиллярного давления ψ [см H_2O], более высокое по сравнению с $\psi_{\text{НВ}}$. При таком высоком значении ψ почва уже не способна удерживать влагу, а образующийся избыток воды стекает под действием силы тяжести за пределы увлажняемого корнеобитаемого слоя почвенного профиля. Это приводит к непроизводительным потерям влаги, а также агрохимикатов, вымываемых нисходящим потоком воды, который обусловлен завышенной нормой орошения.

Чтобы избежать непроизводительных потерь, необходимо применять не «традиционную», а прецизионную норму орошения, вычисленную по соответствующей сканирующей ветви увлажнения петли гистерезиса. Основное

требование, которое предъявляется к прецизионной норме, является следующим: норма должна быть такой, чтобы при увеличении влагозапаса в корнеобитаемом слое почвы значение капиллярного давления влаги не превысило бы $\psi_{\text{НВ}}$ на соответствующей сканирующей ветви иссушения, следующей непосредственно после сканирующей ветви увлажнения, определяемой данной нормой. Объемная влажность почвы, которая соответствует значению $\psi_{\text{НВ}}$ на такой сканирующей ветви иссушения, называется «эффективной» НВ. Отсюда видна актуальность задачи определения сканирующих ветвей гистерезиса. Эту задачу невозможно решить, если опираться только на данные прямых измерений. Объясняется это тем, что измерения сканирующих ветвей гистерезиса являются весьма трудоемкими; кроме того, заранее не известно, какие именно ветви гистерезиса понадобятся в текущем сезоне вегетации, особенно, если культура возделывается в условиях сельскохозяйственного поля (принимая во внимание весьма низкую точность метеопрогнозов). В данном случае применение физически адекватной математической модели гистерезиса водоудерживающей способности почвы не имеет альтернативы. Однако проблемой является не только отсутствие такой модели: проблему представляет также отсутствие метода оценки значения «эффективной» НВ, то есть оценки критического значения капиллярного давления почвенной влаги $\psi_{\text{НВ}}$, выше которого почва не способна удерживать воду. В настоящее время наиболее перспективным представляется эмпирический метод Воронина [4]. С применением этого метода «эффективная» НВ может быть оценена по точке пересечения определенной сканирующей ветви увлажнения гистерезиса с так называемой «секущей» Воронина, которая представлена соотношением:

$$\psi_{\text{НВ}} = 10^{2,17+\text{НВ}/\rho_b}, \tag{1}$$

где ρ_b – плотность сложения почвы [г·см$^{-3}$].

Эмпирическую зависимость (1) описывает множество точек, каждая из которых соответствует «эффективной» НВ на соответствующей ветви водоудерживающей способности почвы того или иного гранулометрического состава.

Исследование, проведенное авторами, является развитием двух известных моделей гистерезиса: модели Скотта и соавторов [14], а также модели Кула и Паркера [15]. В проведенном исследовании за основу моделирования гистерезиса приняты представления о почве как капиллярно-пористой среде. Для описания водоудерживающей способности используется функция WRC-HT. Напомним, что для параметров этой функции предложена физико-статистическая интерпретация: $\alpha = -1/(\psi_0 - \psi_e)$ [см H_2O^{-1}]; ψ_e [см H_2O] – капиллярное давление «входа воздуха»; ψ_0 [см H_2O] – капиллярное давление, при котором плотность распределения вероятностей по значениям случайной величины $-\ln\big((\psi - \psi_e)/(\psi_0 - \psi_e)\big)$ с нулевым генеральным средним и стандартным отклонением σ достигает максимума ($\psi_0 < \psi_e$); $n = 4/\big(\sigma\sqrt{2\pi}\big)$. Нижний индекс параметра ψ_e обозначен «*e*», что означает «вход» (entrance). При учете гистерезиса для обозначения параметров, аналогичных отмеченным выше параметрам α, n и ψ_e, применяются дополнительные индексы «*d*» (drying) и «*w*» (wetting): в частности для ветвей иссушения $\psi_e = \psi_{e,d} \leq 0$ (давление «входа воздуха»), для ветвей увлажнения $\psi_e = \psi_{e,w} \geq 0$ (давление «входа воды»).

Как отмечено выше, при «традиционной» норме, вычисленной по разности между «нормативной» НВ и значением предполивной влажности почвы, возникает избыток свободной (гравитационной) влаги, который приводит к непроизводительным потерям поливной воды и агрохимикатов. Аналогичная ситуация возникает, если при расчете нормы орошений «традиционным» методом

вместо «нормативной» НВ используется НВ, которая определена по точке пересечения «секущей» Воронина с главной ветвью иссушения водоудерживающей способности почвы. Такой метод расчета нормы орошения нередко практикуется, и здесь он также назван «традиционным». В данной работе прецизионная норма орошения вычисляется с учетом требования, чтобы конечным состоянием почвы при увлажнении была точка пересечения «секущей» Воронина [4] со сканирующей ветвью увлажнения водоудерживающей способности. При использовании прецизионной нормы орошения величина θ повышается до «эффективной» НВ на соответствующей сканирующей ветви увлажнения и не превышает «эффективной» НВ на главной ветви иссушения гистерезиса.

Результаты и их обсуждение

1. Прогнозирование значений функции относительной гидравлической проводимости по данным о водоудерживающей способности почвы.

На основе трех рассмотренных систем гидрофизических функций разработан пакет оригинальных компьютерных программ для моделирования водоудерживающей способности и гидравлической проводимости почвы SOILHYDROPHYSICS-V.1.0 [16]. В качестве примера, иллюстрирующего преимущества систем № 2 и № 3 над системой № 1, ниже приведены результаты вычислительных экспериментов, которые были проведены с использованием разработанного пакета компьютерных программ. Эти эксперименты проведены на основе опытных данных о почве «3305 Ida silt loam (>15 cm)» из авторитетного литературного источника (каталога Муалема [17]). В этом источнике для рассматриваемой почвы имеются данные об измерении главной ветви иссушения и главной (граничной) ветви увлажнения гистерезиса водоудерживающей способности, а также данные об измерении гидравлической проводимости почвы. Далее приводятся результаты: (i) идентификации параметров гидрофизических функций путем точечной аппроксимации опытных данных о водоудерживающей способности (WRC) и (ii) прогнозирования значений функции относительной гидравлической проводимости (RHC) почвы.

Функции в таблице 1, описывающие относительную гидравлическую проводимость, содержат единственный экспоненциальный параметр n. По мнению авторов данной статьи, для относительной гидравлической проводимости, выраженной в виде зависимости $k(\theta)/k_s$, феномен гистерезиса не характерен. Это означает, что результаты прогнозирования $k(\theta)/k_s$ не должны существенно отличаться, если для идентификации параметров гидрофизических функций почвы используются данные о главной ветви иссушения или о главной ветви увлажнения или об обеих этих ветвях совместно. Это означает, что параметр n, в принципе, должен принимать одно значение: как для ветвей иссушения, так и для ветвей увлажнения гистерезиса водоудерживающей способности. Можно предположить, что применение такого ограничительного условия для параметра n может привести к повышению погрешности точечной аппроксимации опытных данных о гистерезисе водоудерживающей способности. Однако этот возможный негативный фактор может быть компенсирован двумя положительными факторами: во-первых, если результаты моделирования $k(\theta)/k_s$ подтверждаются опытными данными; во-вторых, если при моделировании $\theta(\psi)$ устраняется нежелательный (искусственный) «эффект помпы», который заключается в возможном пересечении сканирующих и главных ветвей гистерезиса, что физически недопустимо [18]. Проведенные с использованием пакета компьютерных программ SOILHYDROHYSICS-V.1.0 [16] вычислительные эксперименты заключались в следующем. Методом точечной аппроксимации данных прямых измерений водоудерживающей способности осуществлена идентификация параметров, являющихся общими для соответствующей системы функций $\theta(\psi)$ и $k(\theta)/k_s$. Идентификация проводилась двумя способами: во-первых, при отсутствии условия равенства значений

экспоненциального параметра; во-вторых, при наличии условия равенства этих значений для ветвей иссушения и увлажнения гистерезиса водоудерживающей способности. В таблице 2 приведены значения параметров трех сравниваемых систем гидрофизических функций для почвы «3305 Ida silt loam (>15 cm)». В таблице 2 и далее используются дополнительные нижние индексы: «*d*» для ветвей иссушения и «*w*» для ветвей увлажнения петли гистерезиса.

Таблица 2 – Параметры гидрофизических функций для почвы «3305 Ida silt loam (>15 cm)»

Система	Параметр почвенно-гидрофизических моделей									
	θ_r	θ_s	$\psi_{e,d}$	$\psi_{0,d}$	α_d	$\psi_{e,w}$	$\psi_{0,w}$	α_w	n_d	n_w
$n_d = n_w$										
1	0,0000	0,5300	-	−56,78	0,0176	-	−32.23	0,0310	1,306	1,306
2	0,1657	0,5300	0,0000	−195,53	0,0051	27,65	−125,18	0,0065	1,200	1,200
3	0,1614	0,5300	0,0000	−200,07	0,0050	26,26	−127,69	0,0065	1,226	1,200
$n_d \neq n_w$										
1	0,0119	0,5300	-	−73,16	0,0137	-	−23,87	0,0419	1,369	1,283
2	0,1605	0,5300	0,0000	−202,15	0,0049	19,11	−125,72	0,0069	1,193	1,064
3	0,1538	0,5300	0,0000	−210,15	0,0048	15,16	−129,53	0,0069	1,214	1,039

Таблица 3 – Сравнение погрешностей точечной аппроксимации измеренной водоудерживающей способности и оценивания (прогнозирования) относительной гидравлической проводимости почвы при сравнении с соответствующими опытными данными для почвы «3305 Ida silt loam (>15 cm)»

<table>
<tr><th rowspan="3">Вариант идентификации параметров</th><th colspan="6">Среднеквадратическая ошибка</th></tr>
<tr><th colspan="2">Система № 1</th><th colspan="2">Система № 2</th><th colspan="2">Система № 3</th></tr>
<tr><th>WRC</th><th>RHC</th><th>WRC</th><th>RHC</th><th>WRC</th><th>RHC</th></tr>
<tr><td>$n_d = n_w$</td><td>0,0174</td><td>0,0865</td><td>0,0065</td><td>0,0310</td><td>0,0069</td><td>0,0665</td></tr>
<tr><td>$n_d \neq n_w$
(в RHC используется n_d)</td><td rowspan="2">0,0147</td><td>0,0678</td><td rowspan="2">0,0061</td><td>0,0312</td><td rowspan="2">0,0063</td><td>0,0668</td></tr>
<tr><td>$n_d \neq n_w$
(в RHC используется n_w)</td><td>0,0946</td><td>0,0194</td><td>0,0301</td></tr>
</table>

Таблица 4 – Достоверность различий между погрешностями оценивания (прогнозирования) относительной гидравлической проводимости почвы для различных вариантов идентификации с использованием критерия Вильямса-Клута

<table>
<tr><td colspan="9">$y - \frac{y_1 + y_2}{2} = \lambda(y_1 - y_2)$, где y − опытные данные,</td></tr>
<tr><td colspan="9">y_1 − RHC при $n_d = n_w$; y_2 − RHC при n_w</td></tr>
<tr><td colspan="3">Система № 1</td><td colspan="3">Система № 2</td><td colspan="3">Система № 3</td></tr>
<tr><td>λ</td><td>$\lambda_{0.95}$</td><td>$\lambda_{0.99}$</td><td>λ</td><td>$\lambda_{0.95}$</td><td>$\lambda_{0.99}$</td><td>λ</td><td>$\lambda_{0.95}$</td><td>$\lambda_{0.99}$</td></tr>
<tr><td>10.78</td><td>0.992</td><td>1.434</td><td>-0.317</td><td>0.231</td><td>0.334</td><td>-1.310</td><td>0.065</td><td>0.094</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_1 точнее, чем y_2</td><td colspan="3">y_1 и y_2 не имеют достоверных различий</td><td colspan="3">y_2 точнее, чем y_1</td></tr>
<tr><td colspan="9">y_1 − RHC при $n_d = n_w$, y_2 − RHC при n_d</td></tr>
<tr><td colspan="3">Система № 1</td><td colspan="3">Система № 2</td><td colspan="3">Система № 3</td></tr>
<tr><td>λ</td><td>$\lambda_{0.95}$</td><td>$\lambda_{0.99}$</td><td>λ</td><td>$\lambda_{0.95}$</td><td>$\lambda_{0.99}$</td><td>λ</td><td>$\lambda_{0.95}$</td><td>$\lambda_{0.99}$</td></tr>
<tr><td>-3.852</td><td>0.439</td><td>0.635</td><td>39.84</td><td>28.45</td><td>41.14</td><td>104.13</td><td>49.57</td><td>71.66</td></tr>
<tr><td colspan="3">y_2 точнее, чем y_1</td><td colspan="3">y_1 и y_2 не имеют достоверных различий</td><td colspan="3">y_2 точнее, чем y_1</td></tr>
</table>

В таблице 3 приведены среднеквадратические отклонения результатов точечной аппроксимации данных об измеренной водоудерживающей способности (WRC), а также результатов прогнозного оценивания относительной гидравлической проводимости исследуемой почвы (RHC) от соответствующих опытных данных. Жирным шрифтом выделены наименьшие значения погрешностей. Далее были вычислены прогнозные оценки значений $k(\theta)/k_s$. Результаты попарного сравнения погрешностей этих оценок в различных вариантах идентификации параметров гидрофизических функций с использованием критерия Вильямса-Клута [19] (при доверительных вероятностях 0,95 и 0,99) приведены в таблице 4.

На рисунках 1–3 представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных в трех вариантах идентификации параметров: (i) использованы данные об обеих главных ветвях (иссушения и увлажнения) гистерезиса водоудерживающей способности совместно при условии $n_d = n_w$; (ii) использованы данные только о главной ветви иссушения и параметр n_d; (iii) использованы данные только о главной ветви увлажнения и параметр n_w. На рисунках 1–3 изображены: сплошными кривыми – результаты точечной аппроксимации данных о водоудерживающей способности исследуемой почвы, а также результаты прогнозного оценивания относительной гидравлической проводимости с использованием идентифицированных параметров по данным о водоудерживающей способности; точками – опытные данные.

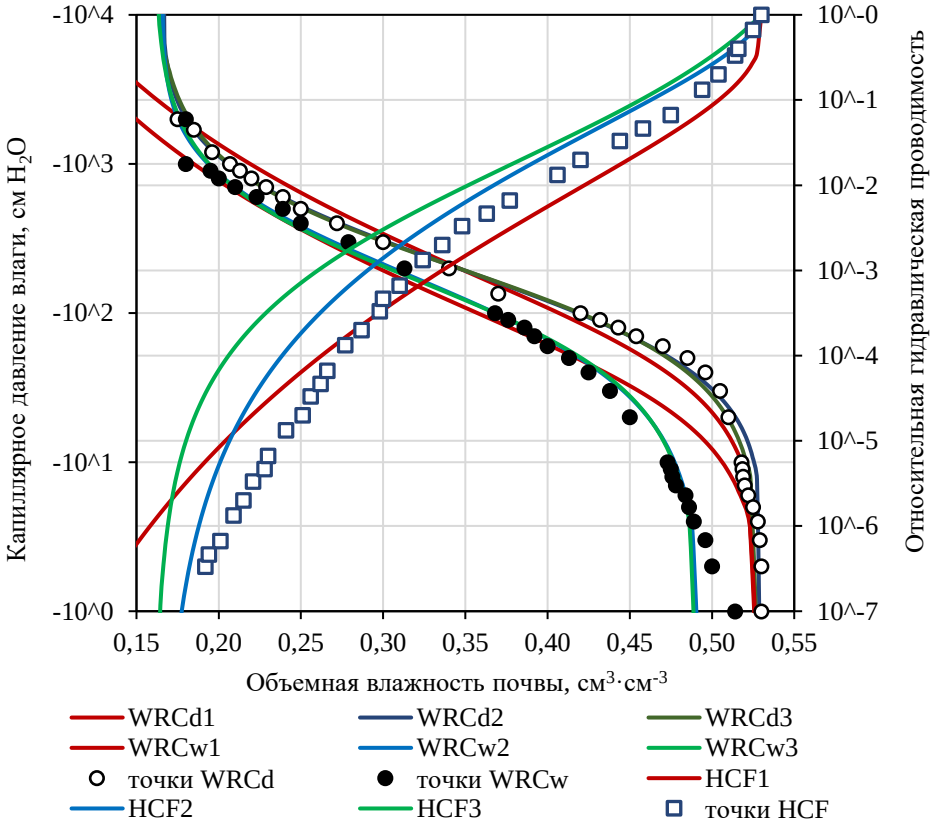

Рисунок 1 – Сравнение результатов моделирования с опытными данными в варианте идентификации параметров по данным об обеих ветвях гистерезиса (при условии $n_d = n_w$)

Примечание. *Здесь и далее: красные кривые – система № 1; синие – система № 2, зеленые – № 3; белые круглые точки – данные о главной ветви иссушения водоудерживающей способности; черные круглые точки – данные о главной ветви увлажнения водоудерживающей способности; белые квадратные точки - данные об относительной гидравлической проводимости почвы.*

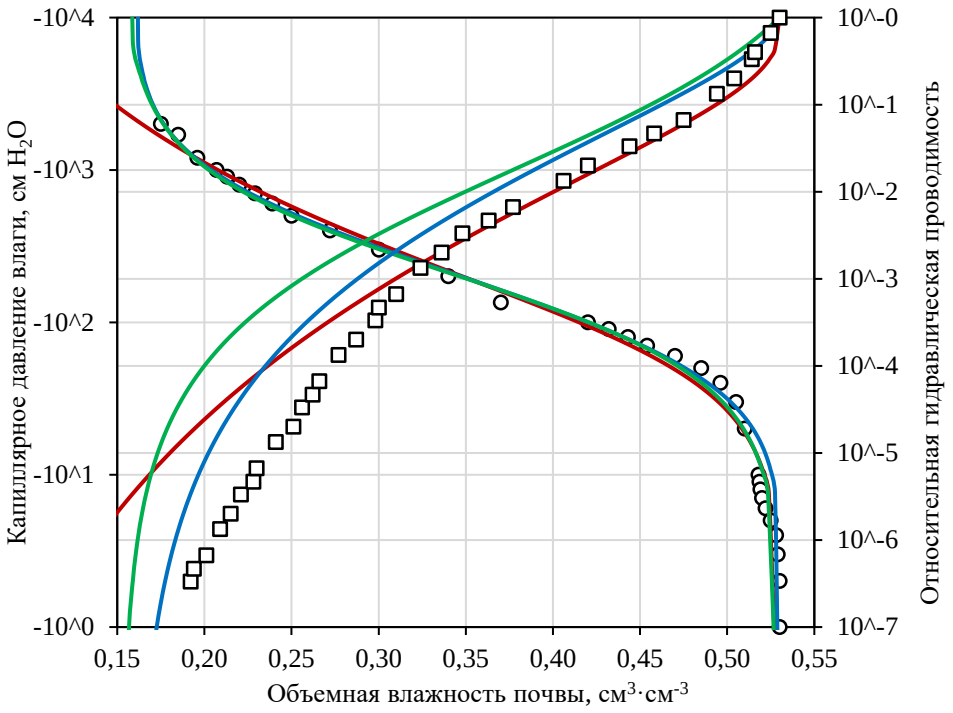

Рисунок 2 – Сравнение результатов моделирования с опытными данными в варианте идентификации параметров по данным только о главной ветви иссушения (используется параметр n_d)

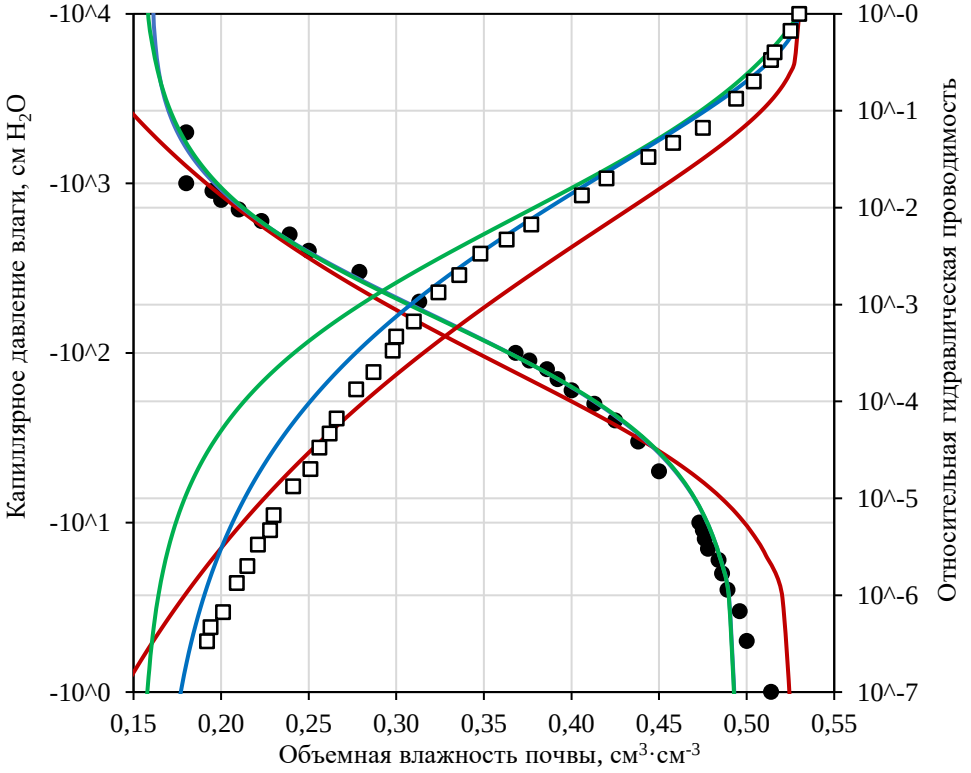

Рисунок 3 – Сравнение результатов моделирования с опытными данными в варианте идентификации параметров по данным только о главной ветви увлажнения (используется параметр n_w)

В таблице 5 приведены результаты сравнительного анализа с использованием критерия Вильямса-Клута [19] (при доверительных вероятностях 0,95 и 0,99) с целью выявления значимых различий между погрешностями сравниваемых систем гидрофизических функций почвы.

Таблица 5 – Достоверность различий между погрешностями прогнозирования относительной гидравлической проводимости исследуемой почвы для трех попарно сравниваемых систем почвенно-гидрофизических функций с использованием критерия Вильямса-Клута

$y - \frac{y_1 + y_2}{2} = \lambda(y_1 - y_2)$, где y – опытные данные								
Точечная аппроксимация данных о водоудерживающей способности (WRC):								
y_1: Система № 1, y_2: Система № 2			y_1: Система № 1, y_2: Система № 3			y_1: Система № 2, y_2: Система № 3		
λ	$\lambda_{0.95}$	$\lambda_{0.99}$	λ	$\lambda_{0.95}$	$\lambda_{0.99}$	λ	$\lambda_{0.95}$	$\lambda_{0.99}$
-0.465	23.26	33.28	-0.451	23.45	33.56	0.930	29.98	34.32
y_1 и y_2 не имеют достоверных различий			y_1 и y_2 не имеют достоверных различий			y_1 и y_2 не имеют достоверных различий		
Оценка относительной гидравлической проводимости (RHC):								
y_1: Система № 1, y_2: Система № 2			y_1: Система № 1, y_2: Система № 3			y_1: Система № 2, y_2: Система № 3		
λ	$\lambda_{0.95}$	$\lambda_{0.99}$	λ	$\lambda_{0.95}$	$\lambda_{0.99}$	λ	$\lambda_{0.95}$	$\lambda_{0.99}$
-0.337	0.078	0.113	-0.091	0.052	0.074	0.838	0.193	0.279
y_2 точнее, чем y_1			y_2 точнее, чем y_1			y_1 точнее, чем y_2		

Из рисунков 1–3 и таблицы 5 следует, что для прогнозного оценивания относительной гидравлической проводимости, в принципе не имеет существенного значения, какие ветви гистерезиса водоудерживающей способности почвы используются для идентификации параметров. Следовательно, результаты исследования подтверждают предположение авторов о том, что для относительной гидравлической проводимости почвы, выраженной в виде зависимости $k(\theta)/k_s$, феномен гистерезиса не характерен.

2. Расчет прецизионной нормы орошения в сравнении с нормой, вычисленной «традиционным» методом.

На основе трех представлений о гистерезисе водоудерживающей способности почвы с использованием рассмотренных выше трех систем гидрофизических функций разработан пакет оригинальных компьютерных программ для расчета прецизионной нормы орошения SOILHYSTERESIS-V.1.0 [20].

На рисунке 4 приведен пример, иллюстрирующий преимущество прецизионной нормы орошения над нормой, рассчитанной «традиционным» методом [13]. В расчетах использованы литературные данные из каталога Муалема для почвы «3305 Ida silt loam (>15 cm)» (плотность сложения почвы ρ_b=1,22 [г·см$^{-3}$]) [17]. Полная влагоемкость почвы (ПВ) оценивается параметром θ_s=0,530 [см^3·см$^{-3}$]. Главные ветви гистерезиса водоудерживающей способности исследуемой почвы построены с использованием функции WRC-HT и параметров, идентифицированных путем точечной аппроксимации опытных данных (таблица 2); главная ветвь иссушения и главная ветвь увлажнения изображены на рисунке 4.

Значение предполивной влажности почвы задано при условии, что точка на диаграмме гистерезиса водоудерживающей способности, соответствующая началу полива, должна располагаться внутри петли гистерезиса, образованной главными

ветвями иссушения и увлажнения, и не находиться на главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы. Это условие применяется впервые.

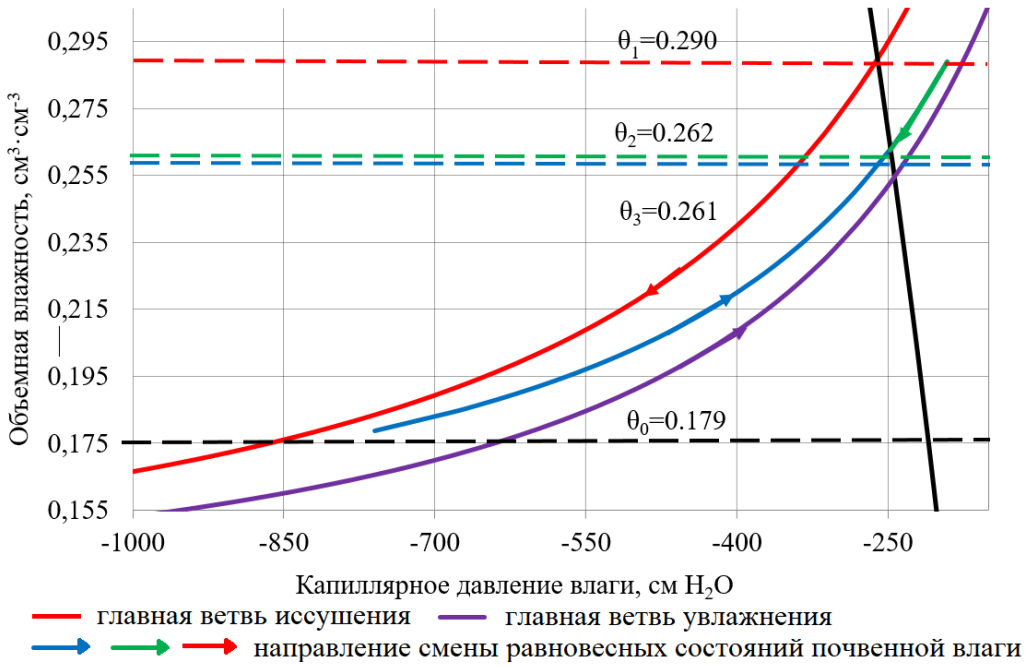

Рисунок 4 – Сравнение «традиционной» и прецизионной норм орошения. Оценка непроизводительных потерь поливной воды при использовании «традиционной» нормы

В практическом ирригационном земледелии координаты точки начала полива могут определяться в полевых условиях с использованием датчиков влажности почвы и давления почвенной влаги. На рисунке 4 предполивная влажность почвы θ_0 равна 0,179 [см^3·см$^{-3}$]; этому значению соответствует капиллярное давление почвенной влаги: $\psi = -760$ [см H_2O].

Сканирующая ветвь увлажнения гистерезиса водоудерживающей способности (изображена на рисунке 4 кривой синего цвета) рассчитана по алгоритму Скотта и соавторов [14] с использованием функции WRC-HT и начинается от заданного значения предполивной влажности почвы θ_0. Наименьшая влагоемкость почвы (НВ) соответствует значению объемной влажности почвы в точке пересечения главной ветви иссушения с «секущей» Воронина (изображена на рисунке 4 кривой черного цвета): это значение равно θ_1 = 0,290 [см^3·см$^{-3}$]. Норма орошения (в единицах θ) при расчете «традиционным» методом определяется разностью между НВ и θ_0 и составляет 0,111 [см^3·см$^{-3}$]. Для участка площадью 1 га при увлажнении почвенного слоя мощностью 50 см эта норма равна $0{,}111 \times 0.5 \cdot 10^4 = 555$ [м^3·га$^{-1}$].

При использовании «традиционной» нормы после достижения объемной влажности почвы значения θ_1 избыточная влага стекает по сканирующей ветви иссушения (изображена на рис. 4 кривой зеленого цвета), которая рассчитана по алгоритму Скотта и соавторов [14] с использованием функции WRC-HT; при этом величина θ достигает значения, соответствующего точке пересечения сканирующей ветви иссушения с «секущей» Воронина: оно равно θ_2 = 0,262 [см^3·см$^{-3}$]. Отсюда следует, что при норме орошения, вычисленной «традиционным» методом, непроизводительный расход поливной воды, стекающей за пределы орошаемого слоя (в единицах θ), составляет Δ = НВ - θ_2 = 0,028 [см^3·см$^{-3}$]. Для участка площадью 1 га

при увлажнении почвенного слоя мощностью 50 см суммарный непроизводительный расход воды достигает $0{,}028 \times 0{,}5 \cdot 10^4 = 140$ [$м^3 \cdot га^{-1}$].

При расчете прецизионной нормы значение предполивной влажности почвы, откуда начинается сканирующая ветвь увлажнения (изображена на рис. 4 кривой синего цвета), которая вычислена по алгоритму Скотта и соавторов [14] с использованием функции WRC-HT, принято таким же, как в расчете «традиционным» методом: оно равно 0,179 [$см^3 \cdot см^{-3}$]. По точке пересечения сканирующей ветви увлажнения с «секущей» Воронина [4] определено значение объемной влажности почвы $\theta_3 = 0{,}261$ [$см^3 \cdot см^{-3}$]. При этом избытка свободной влаги не должно образовываться. Прецизионная норма орошения (в единицах θ), вычисленная по разности между θ_3 и предполивной влажностью почвы, равна 0,082 [$см^3 \cdot см^{-3}$]. Для участка площадью 1 га при увлажнении почвенного слоя мощностью 50 см прецизионная норма равна $0{,}082 \times 0{,}5 \cdot 10^4 = 410$ [$м^3 \cdot га^{-1}$].

Следовательно, прецизионная норма оказывается меньше нормы, рассчитанной «традиционным» методом, на величину $\delta = \theta_1 - \theta_3 = 0{,}029$ [$см^3 \cdot см^{-3}$]. Для участка 1 га при увлажнении почвенного слоя мощностью 50 см разность между «традиционной» и прецизионной нормами орошения составляет: $0{,}029 \times 0{,}5 \cdot 10^4 = 145$ [$м^3 \cdot га^{-1}$]. В зависимости от текстуры почвы непроизводительный расход воды может быть несколько меньше разности между «традиционной» и прецизионной нормами орошения (как в данном примере), но может даже и превысить эту разность.

Выводы

Предложено теоретическое описание гидрофизических свойств почвы в рамках представлений о почве как капиллярно-пористой среде; сформулированы почвенно-гидрофизические функции для их использования в имитационных динамических моделях продукционного процесса сельскохозяйственных культур.

Сравниваемые системы почвенно-гидрофизических функций в отношении погрешностей точечной аппроксимации опытных данных о водоудерживающей способности не имеют между собой достоверных различий; но в отношении погрешностей прогнозных оценок значений функции относительной гидравлической проводимости почвы система № 1 достоверно уступает системам № 2 и № 3.

Учитывая, что данные прямых измерений гидрофизических свойств почвы до сих пор имеют весьма невысокую точность, к практическому применению рекомендуются функции системы № 3. Данные функции имеют перспективу использования широким кругом специалистов; следует ожидать существенного повышения точности моделирования динамики почвенной влаги для разработки ресурсосберегающих технологий прецизионного земледелия на орошаемых землях.

Представлен метод расчета прецизионной нормы орошения и показаны его преимущества: применение прецизионной нормы орошения предотвращает непроизводительную потерю поливной воды, удобрений, мелиорантов и средств защиты растений, а также понижает риск загрязнения природных вод агрохимикатами. При увлажнении расчетного слоя почвы мощностью 50 см нормой орошения 555 [$м^3 \cdot га^{-1}$], рассчитанной по «традиционной» методологии, непроизводительный расход поливной воды может достигать 145 [$м^3 \cdot га^{-1}$] и более, т есть экономия воды за счет усовершенствования технологии планирования орошения может достигать уровня 25 %.

Выдвинуто предложение дальнейшего совершенствования метода расчета прецизионной нормы орошения для разработки ресурсосберегающих технологий и информационного обеспечения современных систем производства растениеводческой продукции в условиях ирригационного земледелия с учетом требований экологической допустимости и экономической целесообразности.

Литература

1. Poluektov R. A., Fintushal S. M., Oparina I. V., Shatskikh D. V., Terleev V. V., Zakharova E. T. AGROTOOL – a system for crop simulation // Archives of Agronomy and Soil Science. 2002. Vol. 48(6). P. 609–635.

2. Richards L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums // Physics. 1931. Vol. 1 (5). P. 318–333. DOI:10.1063/1.1745010.

3. Глобус А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 356 с.

4. Воронин А. Д. Основы физики почв. М.: Изд-во Московского университета, 1986. 244 с.

5. Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P. J., Vachaud G. A comparison of numerical simulation model for one-dimensional infiltration // Soil Sci. Soc. Am. J. 1977. Vol. 41. P. 285–294.

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. P. 892–989.

7. Mualem Y. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res. 1976. Vol. 12. P. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.

8. Терлеев В. В., Миршель В., Баденко В. Л., Гусева И. Ю. Усовершенствованный метод Муалема-Ван Генухтена и его верификация на примере глинистой почвы Бейт Нетофа // Почвоведение. 2017. № 4. С. 457–467. DOI: 10.7868/S0032180X1704013X.

9. Terleev V., Mirschel W., Nikonorov A., Ginevsky R., Lazarev V., Pavlova V., Topaj A., Pashtetsky V., Dunaieva I., Popovych V., Melnichuk A., Layshev K. Improved hydrophysical functions of the soil and their comparison with analogues by the Williams-Kloot test // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. P. 449–461. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_45.

10. Terleev V. V., Ginevsky R. S., Lazarev V. A., Nikonorov A. O., Topaj A., Dunaeva E. A., Petrushin A. F., Mitrofanova O., Zakharova E. Modeling the hydrophysical soil properties and comparative analysis for three systems of functions // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. Art. No. 09016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017509016.

11. Kosugi K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention // Water Resour. Res. 1994. Vol. 30. P. 891–901.

12. Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties // Water Resour. Res. 1996. Vol. 32. P. 2697–2703.

13. Костяков А. Н. Основы мелиорации. М.: Сельхозгиз, 1960. 660 с.

14. Scott P. S., Farquhar G. J., Kouwen N. Hysteretic effects on net infiltration // Proceeding of National Conference on Advances in Infiltration. Publication 11-83. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1983. P. 163–170.

15. Kool J. B., Parker J. C. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties // Water Resources Research. 1987. Vol. 23(1). P. 105–114. DOI: 10.1029/WR023i001p00105.

16. Гиневский Р. С., Терлеев В. В., Топаж А. Г., Лазарев В. А. SOILHYDROPHYSICS-V.1.0. - Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019667106, 19.12.2019. Заявка № 2019662561 от 12.10.2019.

17. Mualem Y. A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. Research Project 442. Israel, Haifa: Technion, Israel Institute of Technology, 1976. 100 p.

18. Terleev V., Mirschel W., Nikonorov A., Lazarev V., Ginevsky R., Topaj A., Moiseev K., Pashtetsky V., Dunaieva I., Popovych V., Melnichuk A., Arkhipov M. Models of hysteresis water retention capacity and their comparative analysis on the example of sandy soil // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. P. 462–471. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_46.

19. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

20. Гиневский Р. С., Терлеев В. В., Топаж А. Г., Лазарев В. А. SOILHYSTERESIS-V.1.0. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019666861, 16.12.2019. Заявка № 2019662560 от 12.10.2019.

References

1. Poluektov R. A., Fintushal S. M., Oparina I. V., Shatskikh D. V., Terleev V. V., Zakharova E. T. AGROTOOL – a system for crop simulation // Archives of Agronomy and Soil Science. 2002. Vol. 48(6). P. 609–635. DOI: 10.1080/0365034021000041597.

2. Richards L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums // Physics. 1931. Vol. 1 (5). P. 318–333. DOI: 10.1063/1.1745010.

3. Globus A. M. Experimental hydrophysics of soils. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 356 p.

4. Voronin A. D. Fundamentals of soil physics. Moscow: Publishing house of Moscow University, 1986. 244 p.

5. Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P. J., Vachaud G. A comparison of numerical simulation model for one-dimensional infiltration // Soil Sci. Soc. Am. J. 1977. Vol. 41. P. 285–294.

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. P. 892–989. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

7. Mualem Y. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res. 1976. Vol. 12. P. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.

8. Terleev V. V., Mirshel W., Badenko V. L., Guseva I. Yu. An improved Mualem-Van Genuchten method and its verification using data on Beit Netofa clay // Pochvovedenie. 2017. No. 4. P. 457–467. DOI: 10.7868/S0032180X1704013X.

9. Terleev V., Mirschel W., Nikonorov A., Ginevsky R., Lazarev V., Pavlova V., Topaj A., Pashtetsky V., Dunaieva I., Popovych V., Melnichuk A., Layshev K. Improved hydrophysical functions of the soil and their comparison with analogues by the Williams-Kloot test // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. P. 449–461. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_45.

10. Terleev V. V., Ginevsky R. S., Lazarev V. A., Nikonorov A. O., Topaj A., Dunaeva E. A., Petrushin A. F., Mitrofanova O., Zakharova E. Modeling the hydrophysical soil properties and comparative analysis for three systems of functions // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. Art. No. 09016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017509016.

11. Kosugi K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention // Water Resour. Res. 1994. Vol. 30. P. 891–901.

12. Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties // Water Resour. Res. 1996. Vol. 32. P. 2697–2703.

13. Kostyakov A.N. Fundaments of land reclamation. Moscow: Selkhozgiz, 1960. 660 p.

14. Scott P. S., Farquhar G. J., Kouwen N. Hysteretic effects on net infiltration // Proceeding of National Conference on Advances in Infiltration. Publication 11-83. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1983. P. 163–170.

15. Kool J. B., Parker J. C. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties // Water Resources Research. 1987. Vol. 23(1). P. 105–114. DOI:10.1029/WR023i001p00105.

16. Ginevsky R. S., Terleev V. V., Topazh A. G., Lazarev V. A. SOILHYDROPHYSICS-V.1.0. Certificate of registration of the computer program RU 2019667106, 19.12.2019. Application No. 2019662561 dated 12.10.2019.

17. Mualem Y. A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. Research Project 442. Israel, Haifa: Technion, Israel Institute of Technology, 1976. 100 p.

18. Terleev V., Mirschel W., Nikonorov A., Lazarev V., Ginevsky R., Topaj A., Moiseev K., Pashtetsky V., Dunaieva I., Popovych V., Melnichuk A., Arkhipov M. Models of hysteresis water retention capacity and their comparative analysis on the example of sandy soil // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. P. 462–471. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_46.

19. Kobzar A. I. Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists. Moscow: Fizmatlit, 2006. 816 p.

20. Ginevsky R. S., Terleev V. V., Topazh A. G., Lazarev V. A. SOILHYSTERESIS-V.1.0. Certificate of registration of the computer program. RU 2019666861, 16.12.2019. Application No. 2019662560 dated 12.10.2019.

UDC 631.43+004.65

Terleev V. V., Dunaieva Ie. A., Ginevsky R. S., Lazarev V. A., Topaj A. G.

SOIL-HYDROPHYSICAL INFORMATION SUPPORT OF PRECISE IRRIGATION FARMING

Summary. *The relevance of the study is determined by the demand for a physically adequate mathematical description of the interactions of water in the soil to develop a model of soil moisture dynamics as the intellectual core of resource-saving technologies for precise irrigation farming. The aim of the work is theoretical substantiation and mathematical formulation of the hydrophysical functions of the soil, taking into account hysteresis. A description of three systems of soil hydrophysical functions is given. To verify and compare the systems, computational experiments were carried out using both the package of original software and "3305 Ida silt loam (> 15 cm)" soil data from the authoritative literary source – the Mualem catalogue. The parameters of the functions were identified by the method of point approximation of the experimental data on the main branches of the hysteretic water-retention capacity. Using these parameters, we calculated*

(i) predictive estimates for the values of the function of relative hydraulic conductivity; (ii) scanning branches of the hysteretic water-retention capacity; (iii) precise irrigation rate. The hysteresis phenomenon is not typical for the hydraulic conductivity as a function of the volumetric water content in the soil. The original functions of System 3 are recommended for use. The advantages of the proposed method for calculating the precise irrigation rate are shown. The benefit of each system is that the functions forming this system, namely the water-retention capacity and the relative hydraulic conductivity of the soil, have a common set of parameters. For the type of soil considered, in case of using the identical value of pre-irrigation soil moisture (179 [$cm^3 \cdot cm^{-3}$]), both for calculating the precision irrigation rate and according to the "traditional" method, when moistening 50 cm soil layer, the total unproductive water consumption at irrigation rate 555 [$m^3 \cdot ha^{-1}$] can reach 0.029 [$cm^3 \cdot cm^{-3}$] or 140 [$m^3 \cdot ha^{-1}$] in the calculated layer. At the same time, when applying precision standards, an excess of free moisture is not formed. It shows additional opportunities not only to save water during irrigation, especially in arid regions, but also to reduce the leaching of nutrients and agrochemicals outside the calculated soil layer and, accordingly, to reduce the additional environmental load on the surrounding area.

Keywords: *mathematical model, water-retention capacity, hydraulic conductivity, hysteresis, scanning branches, point approximation of experimental data, predictive estimation, Williams-Kloot criterion, precise irrigation rate.*

Терлеев Виталий Викторович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; главный научный сотрудник ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, 14; e-mail: vitaly_terleev@mail.ru.

Дунаева Елизавета Андреевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Гиневский Роман Сергеевич, студент магистратуры ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: rginevski@gmail.com.

Лазарев Виктор Андреевич, студент магистратуры ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: lviktor.97@mail.ru.

Топаж Александр Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научных сотрудник, ООО «Бюро Гиперборея»; 193312, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Подвойского, 40-2; e-mail: alex.topaj@gmail.com.

Terleev Vitaly Viktorovich, Dr. Sc. (Agr.), Professor of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytekhnicheskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russia; chief researcher of Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdansky pr., St. Petersburg, 195220, Russia; e-mail: Vitaly_Terleev@mail.ru.

Dunaieva Ielizaveta Andreevna, Cand. Sc. (Techn.), leading researcher of digital monitoring and agroecosystem modeling Department, FSBSI "Research Institute of Agriculture of Crimea"; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Ginevsky Roman Sergeevich, undergraduate student of of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia; e-mail: rginevski@gmail.com.

Lazarev Viktor Andreevich, undergraduate student of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 195251, Russia; e-mail: lviktor.97@mail.ru.

Topaj Aleksandr Grigorievich, Dr. Sc. (Techn.), leading researcher, LLC «Bureau Hyperborea»; 40-2, Podvoisky str., St. Petersburg, 193312, Russia; e-mail: alex.topaj@gmail.com.

Дата поступления в редакцию – 12.06.2021.
Дата принятия к печати – 05.08.2021.