

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 6 / 2025, Vol. 17, Iss. 6 <https://esj.today/issue-6-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/77NZVN625.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Смирнов, Н. С. Экологически обоснованное моделирование гидрофизических свойств почвы для расчета норм полива / Н. С. Смирнов, В. В. Терлеев, К. Г. Моисеев // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 6. —

URL: <https://esj.today/PDF/77NZVN625.pdf>.

For citation:

Smirnov N.S., Terleev V.V., Moiseev K.G. Ecologically valid modeling of soil hydrophysical properties for calculating irrigation rates. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(6): 77NZVN625. Available at:

<https://esj.today/PDF/77NZVN625.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 551:504.06:631.4

Смирнов Никита Сергеевич

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

Аспирант

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

Аспирант

E-mail: nikita_ssmirnov@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7547-795X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1155743

Терлеев Виталий Викторович

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург, Россия

Профессор

Доктор сельскохозяйственных наук, профессор

E-mail: vitaly_terleev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-5174>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=65853

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506101828>

Моисеев Кирилл Геннадьевич

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

Ведущий научный сотрудник

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия

Исполняющий обязанности заведующий Лабораторией физики почв

Кандидат сельскохозяйственных наук

E-mail: kir_moiseev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3068-0372>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=89737

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7006120487>

Экологически обоснованное моделирование гидрофизических свойств почвы для расчета норм полива

Аннотация. Методы, применяемые в настоящее время для орошения сельскохозяйственных культур, допускают избыток воды в толще почвы и, как следствие, появление промывного режима в почвах. Оросительные нормы рассчитываются по величине показателя наименьшей влагоемкости почв (НВ). Для определения НВ применяется нормативная оценка, согласно, которой наименьшая влагоемкость — это объемная влажность, определяемая по главной ветви иссушения кривой водоудержания почвы при значении потенциала влаги $\psi_{НВ}$, равном —

330 см вод. ст. При нормативной оценке объемов воды для полива происходят непроизводительные потери ценного ресурса — воды на орошение. Проблема усложняется тем, что для важнейшего гидрофизического свойства почвы водоудерживающей способности характерен гистерезис. По причине гистерезиса это свойство зависит от смены состояний почвенной влаги при иссушении или увлажнении почвы. Чтобы избежать непроизводительных потерь воды и понизить уровень риска неблагоприятных экологических последствий от поливов, необходимо применять не «традиционную», а прецизионную норму полива. Цель работы: выполнить верификацию разработанной программы «SoilHysteresis-v.1.0» и далее применением этой программы предложить расчет прецизионных норм полива для минимизации экологического ущерба агроэкосистемам. Для расчета прецизионной нормы полива был выбран чернозем южный слабогумусированный на лессовидной породе, отобранный на землях ФГБУН «НИИСХ Крыма». На основании исследования образцов чернозема был выбран аналог почвы по гранулометрическому составу из каталога Муалема с известными параметрами функции водоудерживающей способности почвы и проведена верификация компьютерной программы SoilHysteresis-v.1.0. С использованием этих параметров вычислена прецизионная норма полива, оценены потенциальный вынос агрохимикатов и возможный экологический ущерб от полива.

Ключевые слова: гидрофизика почв; основная гидрофизическая характеристика почв; гистерезис; динамическое моделирование; норма полива; агроэкосистемы; геоэкология

Введение

Вследствие роста населения планеты последние 50 лет наблюдается увеличение площади орошаемых территорий в зонах земледелия. Одновременное орошение сотен тыс. га сельскохозяйственных угодий, безусловно, оказывает влияние на экологическое состояние агроландшафтов, в том числе — и почвенного покрова. Орошение обязательно сопровождается изменением баланса веществ (воды и химических элементов), а также энергетического статуса экосистемы, сложившихся в процессе длительной эволюции.

Вопросы экологии орошаемого земледелия в основных зонах земледелия важны в разных аспектах: природоохранном, экономическом, социальном: в совокупности они имеют отношение к проблеме обеспечения продовольственной безопасности страны. В аспекте негативного воздействия поливов на окружающую среду необходимо отметить, что орошаемое земледелие, практически неизбежно сопровождается деградацией почв и часто нарушениями в ландшафте в целом. Главные из негативных последствий орошения: подтопление, осолонцевание и вторичное засоление почв. В почвах, соответственно происходит обесструктурирование, дегумификация и нарушение газового режима. В ландшафтном отношении ирригация нередко приводит к ухудшению качества воды в реках и других водоемах, а также разрушение экосистем низовий рек.¹

Темпы развития негативных последствий орошения в различных случаях также существенно различаются. В одних случаях — негативные процессы развиваются очень медленно, постепенно накапливаясь и проявляясь лишь через несколько десятилетий (при орошении пресными водами и соблюдении технологии полива и режима орошения), в других же — в первые 2–3 года орошения (в основном при поливе минерализованными водами).

Главная причина неблагоприятных в экологическом отношении явлений, развивающихся в черноземах при орошении, заключается в несоответствии принятой технологии полива

¹ Орлов Д.С., Васильевская В.Д. Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв // учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 1994. — 272 с.

черноземов их природному процессу почвообразования. Применяемый в настоящее время режим орошения обуславливает создание искусственного промывного режима почв, появление избытка воды в почвенно-грунтовой толще и, как следствие, приводит к нарушению водного, воздушного, окислительно-восстановительного и других режимов почвы. Оросительные и поливные нормы в данном случае являются расчетными, в основе их заложены данные о наименьшей влагоемкости почв (НВ). «Традиционный» расчет таких норм обычно опирается на формулу Костякова², в которой учитывается разность между НВ и предполивной влажностью почвы. Полив рекомендуется начинать при предполивной влажности почвы, соответствующей 70–80 % от НВ. Используемые в данном методе показатели почвы являются относительно легкодоступными. Показатель НВ может быть определен в полевых условиях, например, по методике заливных площадок. Нередко применяется и табличная (нормативная, весьма приближенная) оценка, по которой НВ принимается равной значению объемной влажности почвы θ [см³·см⁻³] на главной ветви иссушения водоудерживающей способности почвы при отрицательном значении капиллярного давления влаги $\psi_{\text{НВ}}$ [см Н₂O], равном — 330 см Н₂O.³ 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 полива 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 полива состоянию почвенной влаги непосредственно после полива соответствует отрицательное значение капиллярного давления ψ [см Н₂O], 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 (дневного) слоя почвенного профиля. Это приводит к непроизводительным потерям влаги, а также пула питательных веществ, внесенных с удобрениями и вымываемых нисходящим потоком воды, который обусловлен завышенной нормой полива. Ситуация осложняется и вариабельностью атмосферных осадков. В результате очень часто на орошаемые массивы вода подается в избытке.

Чтобы избежать непроизводительных потерь воды и снизить или устранить проблему неблагоприятных экологических последствий от поливов для почв и ландшафтов, необходимо применять не «традиционную», а прецизионную норму полива.

Решение задачи оптимизации влагообеспеченности агроценозов с учетом эколого-экономических требований предполагает разработку и применение оперативного прогнозирования динамики почвенной влаги и применения прецизионных норм полива [1–8].

При наличии агрометеорологических данных за некоторый временной период может быть разработан достаточно точный краткосрочный прогноз запасов влаги в корнеобитаемой зоне почвы. Для решения такого класса задач используют различные разработки из семейства имитационных динамических моделей.

² Костяков, А.Н. Основы мелиорации: учебник / А.Н. Костяков. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Сельхозгиз, 1960. — 616 с.

³ Теории и методы физики почв / Е.В. Шейн, Ф.Р. Зайдельман, Л.О. Карпачевский [и др.]. — Тула: Гриф и К, 2007. — 616 с.

Шейн, Е.В. Агрофизика / Е.В. Шейн, В.М. Гончаров. — Ростов на Дону: Общество с ограниченной ответственностью "Феникс", 2006. — 400 с. — (Высшее образование).

Работа, проводимая авторами, в значительной мере опирается на исследования, результаты которых представлены в наших более ранних публикациях. Достаточно обширное цитирование этих публикаций (с учетом того, что данная предметная область является весьма узкой) авторы считают необходимым для формирования наиболее полного представления об актуальности вопросов по тематике исследования.

Цель работы: оценить перспективы применения математической модели гистерезиса водоудерживающей способности почвы на основе функции WRC-НТ для расчета прецизионных норм полива; на примере чернозема южного (республика Крым) верифицировать компьютерную программу «SoilHysteresis-v.1.0 [9], реализующую алгоритм расчета прецизионных норм полива, необходимых для совершенствования агротехнологий и существенного уменьшения экологического ущерба, наносимого поливами агроэкосистемам. Дать приблизительную оценку потерь агрохимикатов при поливах.

Объекты и методы

Для решения поставленной задачи взяты образцы чернозема южного слабогумусированного на лессовидной породе, отобранные на землях ФГБУН «НИИСХ Крыма» (рис. 1).



Рисунок 1. Расположение опытного поля (составлено авторами)

Одной из важнейших проблем орошаемого земледелия на протяжении многих лет является отсутствие метода расчета точной нормы полива, как максимального количества воды, которое почва может удержать в корнеобитаемой зоне [10]. Эта проблема не решена до конца к настоящему времени. Приближенные решения (в связи с гистерезисом) дает функция водоудерживающей способности почвы (основная гидрофизическая характеристика — ОГХ или Water Retention Capacity — WRC) [11–16].

Функция водоудерживающей способности почв, как известно, имеет и ветви сорбции, и ветви десорбции влаги, которые не совпадают на графике зависимости потенциала влаги от влажности. Иначе говоря, содержание воды (влагозапас) в почве при одном и том же (заданном) значении капиллярного давления влаги зависит от «предыстории» состояний почвенной влаги [17–19].

Поэтому при «традиционной» норме энергетическому состоянию воды в почве сразу после полива соответствует значение ψ , более высокое по сравнению с $\psi_{нв}$. При таком высоком

значении капиллярного давления почва не может удерживать влагу, а возникший избыток свободной воды удаляется под действием гравитации за пределы корнеобитаемой зоны профиля почвы. Данное обстоятельство обуславливает непроизводительную потерю поливной воды, а также агрохимикатов, вымываемых гравитационным током влаги, вызванным применением завышенной нормы полива [1–8].

Для того, чтобы минимизировать или даже устранить такую потерю, авторы предлагают применять не «традиционную», а прецизионную норму полива, которая может быть рассчитана с использованием математической модели гистерезиса Нус-SHT [20] с усовершенствованной функцией Хаверкампа и соавторов WRC-НТ [11] по соответствующей сканирующей сорбционной ветви. Укажем важнейшее требование к прецизионной норме: норма должна быть такой, чтобы при возрастании влагозапаса корнеобитаемой зоны капиллярное давление почвенной влаги не превышало бы $\psi_{НВ}$ на соответствующей сканирующей сорбционной ветви, которая следует после сканирующей десорбционной ветви. Объемная влажность почвы, которая соответствует значению $\psi_{НВ}$ на такой сканирующей десорбционной ветви иссушения, нередко называется «эффективной» НВ. Это показывает, что прикладное значение задачи прогнозирования сканирующих ветвей гистерезиса велико. Решить эту задачу только прямым измерением гистерезиса не представляется возможным. Это связано с тем, что такие измерения занимают много времени и невозможно заранее предсказать, какие ветви гистерезиса понадобятся в следующем вегетационном сезоне, особенно если орошаемые растения выращиваются в сельскохозяйственных условиях. Поэтому не существует альтернативы для адекватной, в физическом отношении, математической модели гистерезиса водоудерживающей способности почвы. Однако проблемой является еще и отсутствие метода достоверной оценки значения «эффективной» НВ: иными словами, отсутствие приема оценивания критического значения капиллярного давления почвенной влаги $\psi_{НВ}$, выше которого почва не может удерживать воду. По мнению авторов, в настоящее время для такого оценивания наиболее приемлемым является метод секущих Воронина. С применением данного метода «эффективная» НВ оценивается по точке пересечения десорбционной ветви WRC с так называемой «секущей» Воронина, которая описывается эмпирической формулой⁴:

$$\psi_{НВ} = 10^{2,17+НВ/\rho_b}, \quad (1)$$

где ρ_b — плотность сложения почвы, отнесенная к плотности воды.

Эмпирическую зависимость Воронина описывает множество точек, каждая из которых характеризует «эффективную» НВ на соответствующей ветви водоудерживающей способности почвы той или иной текстуры [4–12].

Как уже было отмечено, при применении «традиционной» нормы, рассчитанной по разности между «нормативной» НВ и предполивной влажностью почвы, возникает избыток гравитационной влаги, который и является причиной непроизводительного расхода поливной воды и средств химизации земледелия. Подобная ситуация имеет место, когда при вычислении нормы полива «традиционным» способом вместо «нормативной» НВ используется НВ, определенная точкой пересечения «секущей» Воронина с главной десорбционной ветвью иссушения гистерезиса водоудерживающей способности почвы. Подобный прием расчета нормы полива также практикуется: будем его также называть «традиционным». В данной работе расчет прецизионной нормы орошения предлагается производить таким образом, чтобы финишное энергетическое состояние почвенной влаги соответствовало бы точке пересечения «секущей» Воронина со сканирующей сорбционной ветвью водоудерживающей способности увлажняемой почвы. При применении такой нормы полива значение θ достигает «эффективной»

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

НВ на соответствующей ветви сканирования и не превышает «эффективную» НВ на главной ветви десорбции петли гистерезиса [1–8].

В мировых научных исследованиях гистерезиса водоудерживающей способности почвы [21; 22], наиболее широко применяются модели, разработанные Скоттом и соавторами [23], а также Кулом и Паркером [24]. Модель гистерезиса [25] опирается на функцию водоудерживания почвы, разработанную Хаверкампом и соавторами [25], а модель гистерезиса [24] опирается на наиболее часто и широко применяемую функцию $\theta(\psi)$, предложенную Ван Генухтенем [26]. В настоящем исследовании применена усовершенствованная версия функции Хаверкампа с соавторами для верификации используемой математической модели также использован ряд данных о гистерезисе водоудерживающей способности почвы текстурного класса Silty Loam по классификации Департамента сельского хозяйства США (USDA) [27].

WRC-НТ — усовершенствованная версия функции Хаверкампа и соавторов [25].

$$S_e = \begin{cases} (1 + (-\alpha(\psi - \psi_e))^n)^{-1}, & \psi < \psi_e; \\ 1, & \psi \geq \psi_e. \end{cases} \quad (2)$$

Охарактеризуем принятые в модели обозначения:

S_e — эффективное (относительное) влагонасыщение почвы

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r); \quad (3)$$

где:

θ_s [см³·см⁻³] — объемная влажность максимального заполнения почвы водой;

θ_r [см³·см⁻³] — объемная влажность почвы, которая соответствует минимальному удельному объему воды как жидкости.

$$n = 4 / (\sigma \sqrt{2\pi}), \alpha = -1 / (\psi_0 - \psi_e), \quad (4)$$

где:

ψ_e [см Н₂O], ψ_0 [см Н₂O] < ψ_e — интерпретированные параметры (для десорбционных ветвей $\psi_e = \psi_{e,d} \leq 0$, для сорбционных ветвей $\psi_e = \psi_{e,w} \geq 0$) (используются нижние индексы: «e» (*entrance*) и дополнительные индексы «d» для десорбционных ветвей (*drying*) и «w» для сорбционных ветвей (*wetting*) гистерезиса);

$\psi_{e,d}$ [см Н₂O] — «давление входа воздуха»;

$\psi_{e,w}$ [см Н₂O] — «давление входа воды»;

ψ_0 [см Н₂O] — давление влаги, при котором плотность распределения вероятностей по значениям нормальной случайной величины $-\ln((\psi - \psi_e) / (\psi_0 - \psi_e))$ с нулевым генеральным средним и стандартным отклонением σ достигает максимума ($\psi_0 < \psi_e$). При $\psi_e = 0$ функции $\theta(\psi)$ модели WRC-НТ порождают в виде частных случаев оригинальные версии функций $\theta(\psi)$, предложенных Косуги [28], а также Хаверкампом и соавторами;

σ — стандартное отклонение распределения пор по размерам [25].

Для расчета прецизионной нормы полива посева необходимо иметь сканирующую ветвь увлажнения водоудерживающей способности почвы (которую моделирует программа «SoilHysteresis-v.1.0»), начинающуюся в точке, соответствующей предполивному значениям объемной влажности почвы и капиллярного давления почвенной влаги. Для того, чтобы получить эту ветвь, следует или провести прямые измерения гистерезиса водоудерживающей

способности почвы, или воспользоваться косвенным оцениванием этой ветви по доступным данным, таким как гранулометрический состав почвы.

В настоящей работе предпринято оценивание сканирующей ветви увлажнения исследуемой почвы на основе измерения гранулометрического анализа этой почвы и последующего использования усредненных параметров усовершенствованной модели Хаверкампа и соавторов. В данном случае усреднение осуществляется на основе опубликованных данных о почвах аналогичной текстуры.⁵

Результаты и обсуждение

Для отнесения почвенного образца к тому или иному гранулометрическому классу почвы по классификации Качинского необходимо определить следующие физические показатели почв: плотность твердой фазы почвы и гигроскопическую влажность почвы. Для определения гранулометрического состава почв и данных показателей применялись общепринятые методики отбора и анализа, почвенных образцов.⁶

Распределение частиц почвы по размерам пересчитано с Российской классификации гранулометрического состава почв на трехчленную классификацию USDA. Рассчитанный гранулометрический состав почв включал фракции песка, пыли и ила и был отображен с помощью «треугольника Ферре».

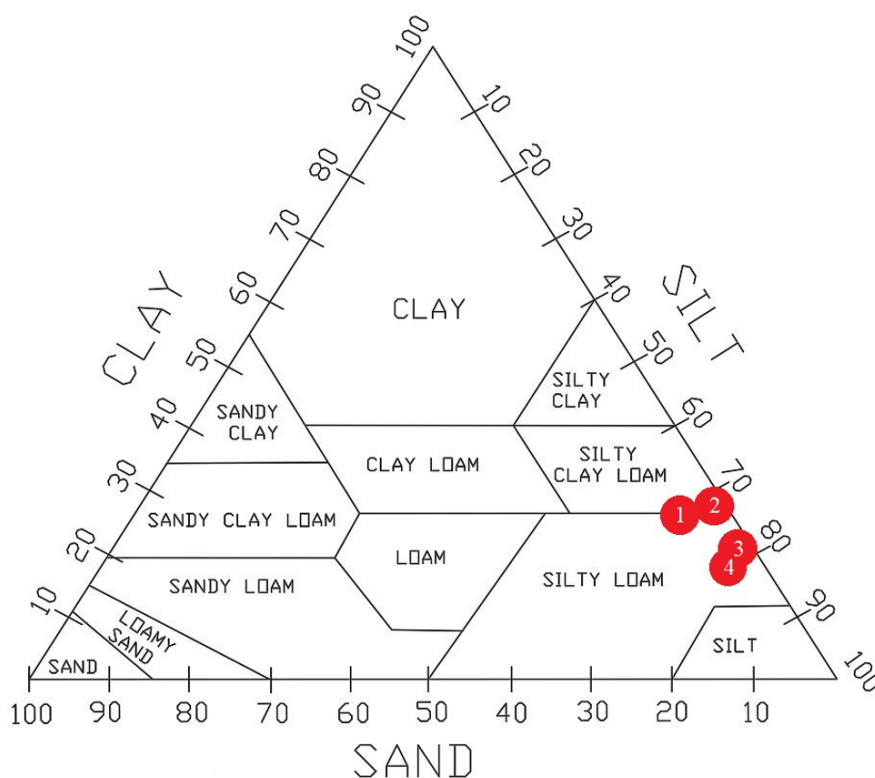


Рисунок 2. Распределение исследуемых образцов на «треугольнике «Ферре» (составлено авторами)

⁵ Лазарев В.А. Математическая модель гистерезиса водоудерживающей способности почво-грунта как теоретическая основа учета гидрологических условий для вычисления прецизионных норм орошения // URL: <https://elibr.spbstu.ru/dl/3/2019/vr/vr19-2761.pdf/info> (дата обращения 15.11.2022). — Текст: электронный.

⁶ Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. — М.: Агропромиздат, 1986. — 416 с.

Исходя из результатов, полученных при помощи «треугольник Ферре», исследуемые почвенные образцы можно отнести к классу Silty Loam (пылеватый суглинок).

В лаборатории физики почвы Агрофизического НИИ для измерения полной (замкнутой) петли гистерезиса водоудерживания почвы имеющегося оборудования оказалось недостаточно. Поэтому для достижения цели работы было принято решение на основе измеренных физических показателей исследуемых образцов восполнить недостающие данные, необходимые для идентификации параметров математической модели гистерезисного водоудерживания почвы, с использованием их опосредованной оценки. Принимая во внимание (рис. 2), что все четыре образца исследуемой почвы относятся к классу SiltyLoam (пылеватый суглинок), было принято решение воспользоваться данными из литературного источника⁵, в которой приведены параметры гидравлических функций почв данного гранулометрического класса. Таких почвенных разностей оказалось четыре. По этим данным были рассчитаны средневзвешенные параметры используемой математической модели гистерезисного водоудерживания почвы WRC-НТ (методом усреднения с весами для четырех почвенных разностей) для почвы класса Silty Loam по классификации USDA (табл. 1) [1–8].

Параметр θ_s оценен по формуле:

$$\theta_s = 1 - \rho_b / \rho_p, \quad (5)$$

где:

ρ_b [г·см⁻³] — плотность сложения почвы;

ρ_p [г·см⁻³] — плотность твердой фазы почвы.

Параметр θ_r оценен по формуле:

$$\theta_r = GB \cdot \rho_b. \quad (6)$$

Таблица 1

Параметры гидравлических функций почвы

Почва	Параметры моделей								
	θ_r	θ_s	$\psi_{e,d}$	$\psi_{0,d}$	α_d	$\psi_{e,w}$	$\psi_{0,w}$	α_w	$n_d = n_w$
Carieolsiltloam	0,3167	0,4415	0	-129,11	0,0078	36,26	-45,65	0,0122	2,889
Grenville silt loam	0,1562	0,4750	-33,29	-498,85	0,0021	-11,81	-127,32	0,0087	0,869
Ida silt loam (> 15 cm)	0,1614	0,5300	0	-200,07	0,005	26,26	-127,69	0,0065	1,226
Ida silt loam (0–15 cm)	0,1729	0,5540	0	-338,13	0,003	35,98	-162,25	0,005	1,066
Среднее значение	-0,0596	-0,4179	-7,52	-279,22	0,0047	22,84	-111,87	0,0083	1,591

Составлено авторами

После оценивания параметров модели гистерезисного водоудерживания почвы был осуществлен ввод этих данных в компьютерную программу, разработанную в СПбПУ Петра Великого «SoilHysteresis-v.1.0». На рисунке 3 представлено диалоговое окно компьютерной программы «SoilHysteresis-v.1.0».

Во вкладке Файл/Параметры вносятся необходимые для построения гистерезисной петли параметры:

ψ_{min} — минимальное отображаемой капиллярное давление почвенной влаги (параметр масштаба);

ψ_{max} — максимальное отображаемой капиллярное давление почвенной влаги (параметр масштаба);

θ_r — объемная остаточная влажность почвы (параметр масштаба);

θ_s — объемная влажность насыщения почвы (параметр масштаба);

$\psi_{0,d}$ — мультипликативный параметр, соответствующий наиболее вероятному радиусу кривизны мениска почвенной влаги для десорбционных ветвей гистерезиса;

$\psi_{0,w}$ — мультипликативный параметр, соответствующий наиболее вероятному радиусу кривизны мениска почвенной влаги для сорбционных ветвей гистерезиса;

$\psi_{e,d}$ — аддитивный параметр, характеризующий капиллярное давление барботирования для десорбционных ветвей гистерезиса;

$\psi_{e,w}$ — аддитивный параметр, характеризующий капиллярное давление входов для сорбционных ветвей;

n_d — экспоненциальный параметр, характеризующий наклон десорбционных ветвей гистерезиса;

n_w — экспоненциальный параметр, характеризующий наклон сорбционных ветвей гистерезиса.

Для визуализации петли гистерезиса исследуемой почвы с использованием введенных параметров в компьютерной программе имеется возможность выбора функции водоудерживающей способности почвы:

Haverkamp et al +

Kosugi +

Van Genuchten

В данной работе используется математическая модель гистерезиса WRC-НТ, в основу которой положена функция водоудерживающей способности, именуемая в программе: *Haverkampetal +*.

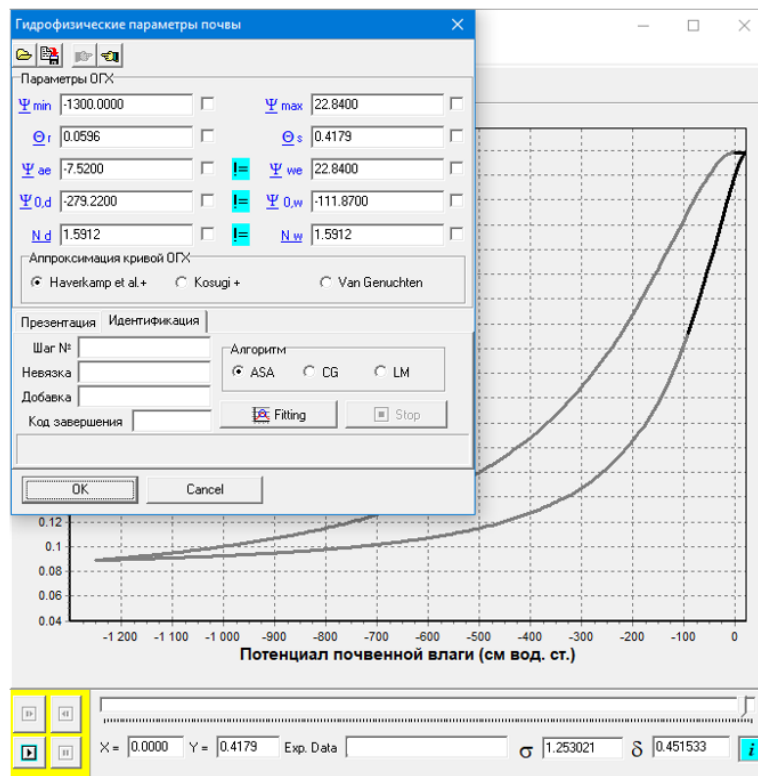
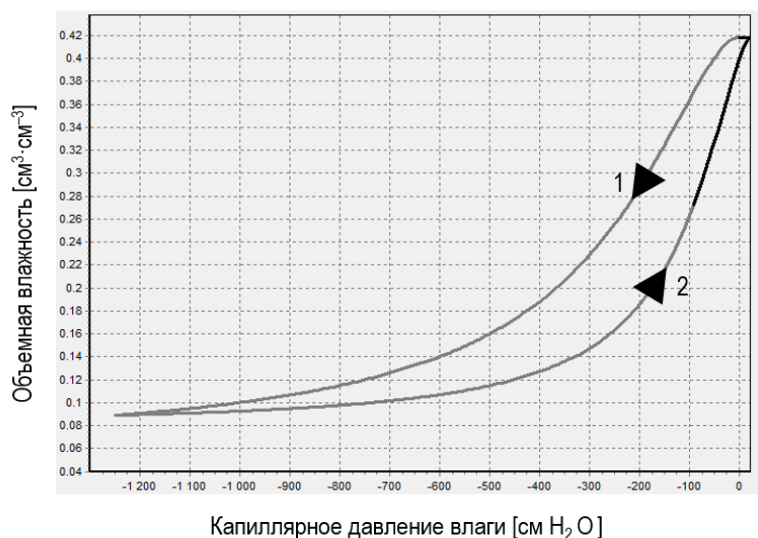


Рисунок 3. Диалоговое окно программы «SoilHysteresis-v.1.0» (составлено авторами)

На рисунке 4 сплошными кривыми представлен результат построения главных (граничных) ветвей гистерезиса водоудерживающей способности исследуемой почвы с применением усредненных параметров функции $\theta(\psi)$, которая используется в модели гистерезиса WRC-HT.



Петля гистерезиса, рассчитанная по модели WRC-HT с использованием усредненных параметров для почв класса Silty Loam из каталога Муалема:

1 – Главная ветвь иссушения;
2 – Главная ветвь увлажнения.

Рисунок 4. Главные (граничные) ветви исследуемой почвы с использованием модели WRC-HT (составлено авторами)

Перейдем к расчету прецизионной нормы полива. Как известно, не все категории почвенной влаги в равной степени доступны растениям. В гидрофизике почвы применяются так называемые агрогидрологические константы, которые разграничивают эти категории влаги. Легкодоступная для растений влага относится к диапазону влажности почвы от полного насыщения до влажности разрыва капиллярной связи (ВРК). При меньшей влажности почвы влага для растений является труднодоступной. Нижним критическим для растений порогом влажности почвы является влажность устойчивого завядания (ВЗ). При более низких значениях влажности почвы растения необратимо завядают. Разность НВ-ВЗ называется диапазоном продуктивной влаги. Вместе с тем, комфортными для растений являются условия, когда влажность почвы не опускается ниже значения ВРК. Значения ВРК для почв разной текстуры различаются. Для исследуемой почвы в качестве усредненного значения ВРК допустимо задать — 800 см H₂O. Это значение в достаточной мере соответствует нижней границей комфортной влажности почвы для большинства орошаемых сельскохозяйственных культур. Поэтому данное значение было принято в качестве предполивного капиллярного давления почвенной влаги при влажности почвы θ_0 . Значение предполивной влажности почвы определяется точкой, которая располагается внутри петли гистерезиса, образованной главной десорбционной и главной сорбционной ветвями, и обычно не находится на главной десорбционной ветви водоудерживающей способности почвы. В условиях практического ирригационного земледелия координаты точки начала полива могут определяться в полевых условиях с использованием датчиков влажности почвы и давления почвенной влаги.

В ходе выполнения работы при проведении вычислительного эксперимента исходная (предполивная) объемная влажность почвы θ_0 была задана 0,100 (см³·см⁻³); этому значению влажности почвы отвечает капиллярное давление влаги: $\psi = -800$ (см H₂O) (рис. 5). При построении сорбционной ветви сканирования (синяя кривая) до точки пересечения с «секущей» Воронина (черная прямая линия) получено значение объемной влажности почвы $\theta_3 = 0,188$ (см³·см⁻³). В этом случае избыток свободной гравитационной влаги не должен образовываться. Прецизионная норма орошения вычисляется по разности между θ_3 и θ_0 , т. е. она равна 0,088 (см³·см⁻³).

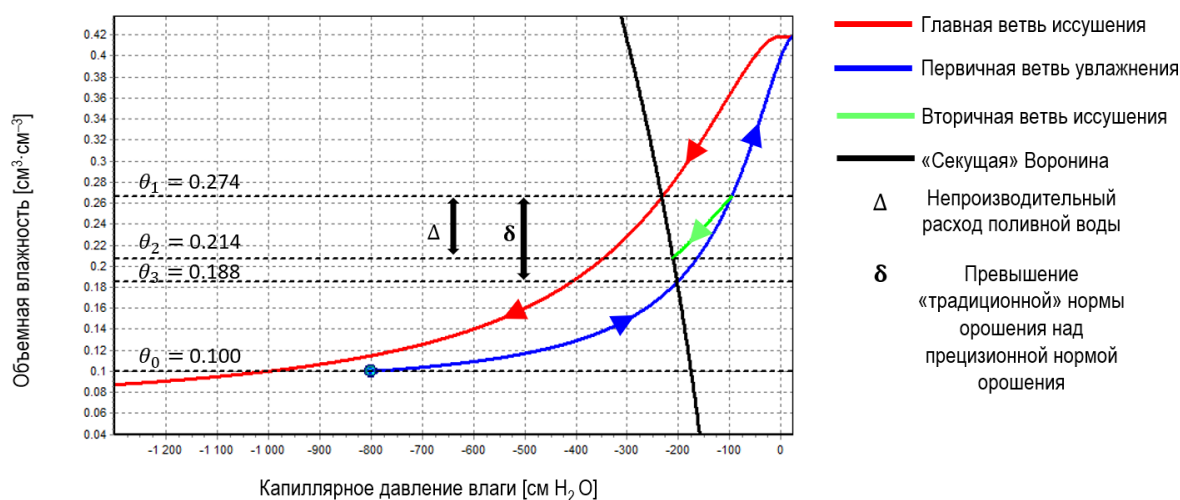


Рисунок 5. Визуализация алгоритма расчета прецизионной нормы орошения (составлено авторами)

В порядке сравнения с полученным здесь результатом для определения нормы орошения применен и т. н. «традиционный» метод, в котором используется наименьшая влагоемкость почвы (НВ), соответствующая точке пересечения главной ветви десорбции (красная кривая) с «секущей» Воронина: она имеет значение $\theta_1 = 0,274$ ($\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$). Норма орошения (в единицах θ) при вычислении по «традиционному» методу определяется по разности между θ_1 и исходной (предполивной) влажностью θ_0 : она достигает $0,174$ ($\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$). Отсюда легко видеть, что прецизионная норма орошения является более низкой по отношению к норме, вычисленной по «традиционному» методу, на величину $\delta = \theta_1 - \theta_3 = 0,086$ ($\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$) (рис. 5). Для земельного участка, который имеет площадь 1 га, при увлажнении слоя почвы мощностью 50 см разность между вычисленными нормами орошения достигает: $0,08 \times 0,5 \cdot 10^4 = 430$ ($\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$).

С «традиционной» нормой орошения после достижения объемной влажности почвы значения $\theta_1 = 0,274$ ($\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$) избыток воды стекает по десорбционной ветви сканирования (зеленая кривая); при этом величина θ принимает значение, соответствующее точке пересечения сканирующей ветви иссушения с «секущей» Воронина: оно равно $\theta_2 = 0,214$ ($\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$). Таким образом, с нормой орошения, вычисленной «традиционным» методом, непроизводительная потеря поливной воды, стекающей за пределы корнеобитаемой зоны почвы (в единицах θ), достигает $\Delta = \theta_1 - \theta_2 = 0,274 - 0,214 = 0,060$ [$\text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3}$]. Для земельного участка, который имеет площадь 1 га, при увлажнении почвенного слоя мощностью 50 см суммарная непроизводительная потеря воды составляет $0,060 \times 0,5 \cdot 10^4 = 300$ ($\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$).

Рисунок 5 показывает, что «традиционная» норма почти в два раза превышает прецизионную норму орошения. Однако, при применении «традиционной» нормы орошения почти половина поливной воды теряется из-за гравитационного стока свободной влаги за пределы корнеобитаемой зоны. На рисунке 5 видно, что после стекания гравитационной воды финишный влагозапас почвы оказывается несколько выше того влагозапаса, который образуется при использовании прецизионной нормы. Тем не менее, следует учитывать, что это незначительное превышение финишного влагозапаса достигается значительной большей непроизводительной потерей поливной воды, чем отмеченная разность влагозапасов. При использовании прецизионной нормы орошения конечный влагозапас оказывается меньше, но при этом устраняется непроизводительная потеря поливной воды. Если рассматривать перспективы применения прецизионной нормы орошения, то, разумеется, важным аргументом её применения является то, что это применение предотвращает не только потери поливной воды, но и вынос средств химизации земледелия за пределы корнеобитаемой зоны почвы, что способствует снижению себестоимости продукции растениеводства.

Например, при средней обеспеченности черноземной почвы питательными элементами, для получения проектируемого урожая зерновых культур в $60\text{--}70 \text{ ц}\cdot\text{га}^{-1}$ необходимо внести $192 \text{ кг}\cdot\text{га}^{-1}$ калийной селитры. Для приблизительной оценки выноса питательных веществ необходимо знать минерализацию непродуцируемых потерь воды после их стекания за пределы почвенного профиля. Если принять минерализацию воды в среднем равную $3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ (а это очень низкий уровень минерализации), то при не продуцируемой потере воды равной $300 \text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$, вынос веществ за пределы почвенного профиля составит $900 \text{ кг}\cdot\text{га}^{-1}$. Учитывая, что действующие вещества азота и калия в селитре составляют суммарно 59 %, то есть в абсолютном выражении в промывных водах азота и калия должно содержаться 531 кг суммарно, а внесено 113,2 кг, учитывая растворимость соли и вынос части полезных веществ во время вегетации ясно, что дефицит минерального питания образующийся при поливе крайне высок (приближенная, оценка, без учета иного выноса $531 - 113 \text{ кг} = 418 \text{ кг}\cdot\text{га}^{-1}$). Что в реальности, конечно, не происходит за счет внутренних резервов почвы и меняющихся агроклиматических условий [29–31].

Применение прецизионной нормы орошения минимизирует риск загрязнения окружающей среды средствами химизации земледелия, что позитивно характеризует перспективу применения точных расчетов нормы орошения.

Вместе с тем, при оценке перспективы применения прецизионной нормы полива следует учитывать фактор доступности (удаленности) поливной воды. Если поливная вода доставляется на орошаемые участки в цистернах тракторами и автомобилями, то частые поливы малыми нормами могут быть неэффективными. Если же орошаемые земли будут обустроены автоматизированными системами подачи поливной воды (например, системой внутрипочвенного капельного орошения), то при наличии датчиков влажности почвы и давления почвенной влаги применение прецизионной нормы полива окажется суперэффективным. В этой связи авторы работы оценивают перспективу применения рассмотренной в исследовании математической модели гистерезисного вододерживания почвы и предлагаемого метода вычисления прецизионных норм полива весьма оптимистично и рекомендует их к широкому внедрению в практическое ирригационное (точное) земледелие.

Заключение

Намеченная в работе цель достигнута, поставленные задачи решены:

1. На основе применения математической модели гистерезиса вододерживающей способности почвы WRC-НТ представлено функциональное описание вододерживающей способности почвы (как капиллярно-пористой среды с учетом гистерезиса) и осуществлена идентификация параметров используемой функции вододерживающей способности почвы в гистерезисной развертке, разработан метод расчета сканирующих ветвей петли гистерезиса вододерживающей способности почвы при помощи компьютерной программы «SoilHysteresis-v.1.0».
2. Дана оценка перспективы применения математической модели гистерезиса вододерживающей способности почвы WRC-НТ для расчета прецизионных норм орошения.
3. Выполнена верификация компьютерной программы «SoilHysteresis-v.1.0.» в отношении расчета прецизионной нормы орошения на примере чернозема южного на лессовидной породе угодий ФГБУН «НИИСХ Крыма».
4. Оценен потенциальный вынос питательных веществ.

Применение физически адекватной математической модели гистерезиса водоудерживающей способности почвы WRC-НТ позволяет с достаточно высокой точностью оценить гидрофизические показатели почвы. Использование модели позволяет рассчитывать прецизионные нормы орошения сельскохозяйственных культур. Применение прецизионных норм орошения предотвращает потерю поливной воды из-за гравитационного стока избытка влаги и вследствие этого устраняет непроизводительный расход удобрений, мелиорантов и средств защиты растений, а также минимизирует риск загрязнения окружающей среды средствами химизации земледелия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терлеев, В.В. Гистерезис водоудерживающей способности почвы: функциональное описание / В.В. Терлеев, А.Г. Топаж, Е.А. Дунаева, Р.С. Гиневский, В.А. Лазарев. — DOI 10.25695/AGRPH.2019.02.09 // Агрофизика. — 2019. — № 2. — С. 64–71. — EDN TGWLSC.
2. Смирнов, Н.С. Физическое обеспечение математического моделирования водоудерживающей способности почвы / Н.С. Смирнов, В.В. Терлеев, К.Г. Моисеев, В.А. Лазарев, Е.А. Дунаева // Неделя науки СПбПУ: материалы науч. конф. — 2023. — С. 211–212. — EDN LJJLBP.
3. Терлеев, В.В. Функциональное описание гидрофизических свойств почвы и его преимущества над функциями Ван Генухтена / В.В. Терлеев, Н.С. Смирнов, Е.А. Дунаева // Агрофизический институт: сб. науч. тр. — 2022. — С. 102–108. — EDN CCBWVF.
4. Смирнов, Н.С. Модель гидрофизических свойств почв и ее сравнение с наиболее известными аналогами / Н.С. Смирнов, В.В. Терлеев, В.В. Гарманов, Е.А. Дунаева, К.Г. Моисеев // Неделя науки СПбПУ: материалы науч. конф. — 2022. — С. 279–282. — EDN MMLXBW.
5. Терлеев, В.В. Гистерезис водоудерживающей способности почвы: сравнение моделей на примере пылеватого суглинка / В.В. Терлеев, Е.А. Дунаева, Р.С. Гиневский, В.А. Лазарев, А.Г. Топаж — DOI 10.5281/zenodo.7471842. // Таврический вестник аграрной науки. — 2022. — № 3(31). — С. 152–167 — EDN TRYVQI.
6. Терлеев, В.В. Почвенно-гидрофизическое информационное обеспечение прецизионного ирригационного земледелия / В.В. Терлеев, Е.А. Дунаева, Р.С. Гиневский, В.А. Лазарев, А.Г. Топаж. — DOI 10.33952/2542-0720-2021-2-26-244-260 // Таврический вестник аграрной науки. — 2021. — № 2(26). — С. 244–259. — EDN XXNYNR.
7. Poluektov, R.A. Crop simulation model of the second and the third productivity levels / R.A. Poluektov, V.V. Terleev — DOI: 10.1007/978-1-4020-4479-3_7. // Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems: Proceedings of the workshop, Müncheberg/Germany. — 2007. — С. 75–89 — EDN PXCVTT.
8. Bouziane, O. Characterization of the water holding capacity of the soils in the Mitidja Plain (Algeria) as a basis for the development of the irrigation water use / O. Bouziane, M. Meddi, J.R. Cardena. — DOI 10.6937/TWC.202112/PP_69(4).0007 // Taiwan Water Conservancy. — 2021. — Т. 69, № 4. — С. 104–122. — EDN DATJIV.

9. SoilHysteresis-v.1.0: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019666861 / Р.С. Гиневский, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж, В.А. Лазарев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет». — № 2019662631; заявл. 29.10.2019; опублик. 16.12.2019. — EDN JQSLXD.
10. Шеин, Е.В. Агрофизическая количественная оценка водного режима черноземов южных орошаемых / Е.В. Шеин, С.В. Махновецкая // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 1994. — № 1. — С. 3–12. — EDN TRQLAV.
11. Terleev, V. Predicting the scanning branches of hysteretic soil water retention capacity with use of the method of mathematical modeling / V. Terleev, R. Ginevsky, V. Lazarev, A. Nikonorov, I. Togo, A. Topaj, K. Moiseev, E. Abakumov, A. Melnichuk, I. Dunaieva. — DOI 10.1088/1755-1315/90/1/012105 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — Т. 90. — С. 012105. — EDN ZTBCVL.
12. Beriozkin, A. Machine learning approach to predicting the hysteresis of water retention curves of porous media / A. Beriozkin, H. Anidjar, A. Azaria, N. Hazon. — DOI 10.1016/j.eswa.2023.121469 // Expert Systems with Applications. — 2024. — Т. 237, №. 9. — С. 121469. — EDN HVMRBZ.
13. Шеин, Е.В. Гистерезис основной гидрофизической характеристики: моделирование ветви увлажнения по кривой иссушения / Е.В. Шеин, А.И. Мади // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2018. — № 3. — С. 36–41. — EDN UNYVMD.
14. Shein, E.V. Validation of HYDRUS-1D for predicting of soil moisture content with hysteresis effect / E.V. Shein, A.Y. Mady, L.I. Il'in. — DOI 10.13187/bgt.2019.1.59 // Biogeosystem Technique. — 2019. — Т. 6, № 1. — С. 59–64. — EDN YIWNBW.
15. Shein, E.V. Hydrophysical Properties of the High-Ash Lowmoor Peat Soils / E.V. Shein, A.P. Shvarov, N.V. Sorokina et al. — DOI 10.1134/S1064229318100113 // Eurasian Soil Science. — 2018. — Т. 51, № 10. — С. 1214–1219. — EDN WTOGAL.
16. Шеин, Е.В. Параметрическая оценка почвенно-физических функций / Е.В. Шеин, А.М. Русанов, Е.И. Николаева, Д.Д. Хайдапова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2007. — № 2. — С. 47–52. — EDN IAMWOD.
17. Моисеев, К.Г. Применение модели фрактальной фракции (PSF) для физического моделирования водоудерживающей способности почвы / К.Г. Моисеев, В.В. Терлеев, М.В. Холохоренко. — DOI 10.25637/TVAN.2018.02.07 // Таврический вестник аграрной науки. — 2018. — № 2(14). — С. 76–88. — EDN ХТҮҮВЗ.
18. Смагин, А.В. Фундаментальная модель водоудерживания на основе теории расклинивающего давления почвенной влаги / А.В. Смагин. — DOI 10.55959/M SU0137-0944-17-2024-79-4-26-40 // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2024. — Т. 79, № 4. — С. 26–40. — EDN CUOBAU.
19. Смагин, А.В. Физически обоснованная термодинамическая модель основной гидрофизической характеристики почв для всего диапазона влажности / А.В. Смагин. — DOI 10.31857/S0032180X24090034 // Почвоведение. — 2024. — № 9. — С. 1191–1206. — EDN WMBPSW.
20. Terleev, V.V. Hysteresis of the soil water-retention capacity: estimating the scanning branches / V.V. Terleev, A.O. Nikonorov, R.S. Ginevsky, V.A. Lazarev, I. Togo, A.G. Topaj, K.G. Moiseev, V.A. Pavlova, K.A. Layshev, M.V. Arkhipov, A.Yu. Melnichuk,

- Е.А. Dunaieva, W. Mirschel. — DOI 10.18720/MCE.77.13 // Magazine of Civil Engineering. — 2018. — № 1(77). — С. 141–148. — EDN XPKZQD.
21. Сорокина, Н.В. Влажностный гистерезис торфоземов: значение структуры порового пространства / Н.В. Сорокина, Е.В. Шейн, К.Н. Абросимов. — DOI 10.26178/AE.2023.47.57.004 // Проблемы агрохимии и экологии. — 2023. — № 1. — С. 23–29. — EDN QTCEDW.
22. Mady, A.Y. Modelling and validation hysteresis in soil water retention curve using tomography of pore structure / A.Y. Mady, E. Shein. — DOI 10.1504/IJW.2018.095403 // International Journal of Water. — 2018. — Т. 12, №. 4. — С. 370–381. — EDN PCJFCP.
23. Scott, P.S. Hysteretic effects on net infiltration / P.S. Scott, G.J. Farquhar, N. Kouwen // Proceeding of National Conference on Advances in Infiltration, Publication 11–83, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan. — 1983. — С. 163–170.
24. Kool, J.B. Development and Evaluation of Closed-Form Expressions for Hysteretic Soil Hydraulic Properties / J.B. Kool, J.C. Parker // Water Resources Research. — 1987. — Т. 23, № 1. — С. 105–114.
25. Haverkamp, R. A comparison of numerical simulation model for one-dimensional infiltration / R. Haverkamp, M. Vauclin, J. Touma, P.J. Wierenga, G. Vachaud // Soil Science Society of America Journal. — 1977. — Т. 41. — С. 285–294.
26. Van Genuchten, M.Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils / M.Th. Van Genuchten // Soil Science Society of America Journal. — 1980. — Т. 44. — С. 892–898.
27. Mualem, Y. A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils / Y. Mualem. — Haifa, Israel: Technion, Israel Institute of Technology, 1976. — 100 с. — (Research Project 442).
28. Kosugi, K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention / K. Kosugi // Water Resources Research. — 1994. — Т. 30. — С. 891–901.
29. Пронько, Н.А. Вынос элементов питания овощными культурами при капельном орошении в Саратовском Правобережье / Н.А. Пронько. — DOI 10.35679/1991-9476-2023-18-4-520-529 // Научная жизнь. — 2023. — Т. 18, № 4(130). — С. 520–529. — EDN ZEDBUI.
30. Пронько, В.В. Вынос и потребление элементов питания овощными и бахчевыми культурами на почвах Поволжья при внесении минеральных и гуминовых удобрений / В.В. Пронько, К.В. Корсаков, Н.А. Пронько. — DOI 10.25680/S19948603.2022.125.16 // Плодородие. — 2022. — № 2(125). — С. 67–70. — EDN ELJENW.
31. Пронько, Н.А. Проблемы орошаемого земледелия Поволжья и их решение / Н.А. Пронько. — DOI 10.28983/asj.y2022i11pp24-30 // Аграрный научный журнал. — 2022. — № 11. — С. 24–30. — EDN TULSSB

Smirnov Nikita Sergeevich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia
E-mail: nikita_ssmirnov@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7547-795X>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1155743

Terleev Vitaly Viktorovich

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vitaly_terleev@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-5174>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=65853
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506101828>

Moiseev Kirill Gennadievich

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia
Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: kir_moiseev@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3068-0372>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=89737
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7006120487>

Ecologically valid modeling of soil hydrophysical properties for calculating irrigation rates

Abstract. The techniques are currently used for irrigation of agricultural crops allow permissible excess water in the soil column and, as a result, the appearance of a percolation regime in soils. Irrigation rates are calculated based on the value of the field capacity indicator. To determine the field capacity, a normative (very approximate) assessment is used. According to this assessment, the field capacity is the volumetric moisture content of the soil on the main branch of desiccation of the soil's water retention function, with a moisture potential value of ψ_{FC} equal to 330 cm H₂O. When the volume of water for irrigation is estimated according to the standard, valuable resources such as irrigation water are wasted. The problem is complicated by the fact that the most important hydrophysical property of soil, water retention capacity, exhibits hysteresis. Due to hysteresis, this property depends on the change in soil moisture states during soil drying or moistening. To avoid unproductive water losses and reduce the risk of adverse environmental consequences from irrigation, it is necessary to use a precision irrigation rate instead of a «traditional» one. The purpose of this work is to verify the developed program «SoilHysteresis-v.1.0» and then use this program to calculate precise irrigation rates to minimize environmental damage to agroecosystems. To calculate the precision irrigation rate, we selected low-humus southern chernozem on loess-like rock, taken from the lands of the «Research Institute of Agriculture of Crimea». Based on the study of chernozem samples, a soil analogue in terms of particle size distribution (soil texture) was selected from the Moalem catalog with defined parameters of the water retention capacity function, and the computer program «SoilHysteresis-v.1.0» was verified. Using the program, the potential removal of nutrients, environmental damage from irrigation, and the prospects for applying precision irrigation standards were assessed based on mathematical modeling.

Keywords: soil hydrophysics; water retention capacity of soil; hysteresis; dynamic modeling; irrigation rate; agroecosystems; geoecology