

ГИДРОДЕПОЗИТАРНЫЕ И ГИДРОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЛАГОПЕРЕНОСА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

© 2015 г. **Е. В. Шеин^{1,2}, Е. Б. Скворцова², С. С. Панина¹,
А. Б. Умарова¹, К. А. Романенко²**

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы
e-mail: evgeny.shein@gmail.com

² Почвенный институт им. В.В. Докучаева,
119017 Россия, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2
e-mail: eskvora@mail.ru

В полевых экспериментах на агродерново-подзолистой среднесуглинистой почве показано, что при наличии гидравлического напора на верхней границе почв движение влаги происходит по преимущественным путям миграции, сокращающим гидродепозитарные характеристики почв. Движение влаги изучали по специальной методике на двух идентичных по размерам (диаметр 42 см, высота 60 см) и почвам монолитах. Перед началом опыта стенки монолитов были обернуты пленкой, покрыты монтажной пеной и закопаны с целью предотвращения боковых потерь влаги. В обоих монолитах одновременно проводили впитывание воды с поверхности, в одном случае на поверхности поддерживали постоянный небольшой напор 5 см, в другом осуществляли мелкодисперсное дождевание без образования слоя воды на поверхности. В задачи работы входило моделирование движения влаги в условиях малонапорной и безнапорной инфильтрации и сравнение расчетных и экспериментальных данных для того, чтобы характеризовать, какое экспериментальное обеспечение модели является наиболее адекватным: основные гидрофизические характеристики (ОГХ), полученные экспериментально эмпирическими методами, либо ОГХ, восстановленные по гидрологическим константам и свойствам почв (педотрансферные функции (ПТФ)). По результатам реальных и модельных данных экспериментальное обеспечение моделей можно расположить в следующем порядке: использова-

ние региональных ПТФ дает лучшие результаты, чем ОГХ, полученная методом тензиостатов и капилляриметров, которые лучше ПТФ, используемых в программе Agrootool и соответственно применяющих в качестве предиктора гранулометрический состав (по базе данных ROSETTA), и ПТФ на основании “секущих” Воронина.

Ключевые слова: гидрофизика почв, математическая модель, экспериментальное обеспечение, педотрансферные функции.

ВВЕДЕНИЕ

Почва выполняет важнейшую депозитарную функцию в глобальном цикле воды. Именно благодаря водоудерживающей способности почвы основная часть воды не стекает в водосборы, а, фильтруясь сквозь почвенный покров, остается в почвенной толще. Эта вода удерживается почвенными силами различной природы: капиллярными, адсорбционными, осмотическими и др., формируя запас воды, который используется растениями, микроорганизмами, в целом наземной и почвенной биотой. Именно эта депозитарная гидрологическая роль почвы и почвенного покрова лежит в основе формирования продукционной функции, а также таких биосферных функций почвы, как создание и поддержание биоразнообразия, сохранения здоровья биосистем, включая человека, и многих других функций, выполнение которых невозможно без создания и поддержания определенных запасов воды.

Как создаются, формируются, расходуются, участвуют в создании сельскохозяйственной продукции эти почвенные запасы воды? Этот вопрос до сих пор остается актуальным, хотя очевидность его стала ясна уже давно. В настоящее время имеется несколько подходов к исследованию проблем формирования и расходования депозитарных запасов почвенной влаги. Изучение водоудерживающих и водопроводящих свойств почвенного покрова в целях оптимизации водного питания растений в мировой науке сложилось на данный момент по двум направлениям. Первое основано на изучении функции водоудерживания (основной гидрофизической характеристики, в российской литературе **ОГХ**) и функции влагопроводности.

Другой подход основан на экспериментальном определении почвенно-гидрологических констант – характеристик состояния влаги в почве, которые количественно отражают условия влаго-

обеспеченности растений. Этот подход опирается на полевые определения таких важнейших почвенно-гидрологических констант, как наименьшая влагоемкость (или предельно полевая влагоемкость), влажность завядания, коэффициент фильтрации. В настоящий момент развитие науки о гидродепозитарной и гидропроводящей функциях как основ управления гидрологией почв во многом связано с развитием моделей движения почвенной влаги, в основе которых лежит основная гидрофизическая характеристика. Вопросы управления всегда опираются на предварительные прогнозные расчеты, которые выполняются на основании математических моделей. Сейчас процедура прогнозного моделирования является обязательной при регистрации пестицидов (Шейн и др., 2005, 2009), при прогнозе явлений затопления, разработке систем городского и сельскохозяйственного водоснабжения, при управлении водными ресурсами и др. (Catchment water, 2005; Šimůnek, et al., 2005). Считается, что на данный момент управление водопользованием направлено не на строительство новых систем, а на точное управление существующими (Poluektov et al., 2002). Как уже указывалось, основные трудности в применении математических физически обоснованных моделей связаны, прежде всего, с получением адекватного экспериментального материала по гидрофизическим свойствам почв (Теории и методы..., 2007; Шейн и др., 1993; 2005). Именно поэтому в настоящее время наиболее актуальны вопросы, связанные с получением и применением экспериментального обеспечения для такого рода моделей.

В качестве экспериментального обеспечения модели используются гидрофизические свойства почв, прежде всего, ОГХ или функция водоудерживания, а также функция влагопроводности. Современная физика почв использует разнообразный набор методов для определения ОГХ: прямые экспериментальные с помощью различных методов (Глобус, 1969; Вадюнина, Корчагина, 1986; Теории и методы..., 2007; Трошина, 2009; Умарова, 2011) и различные расчетные методы (педотрансферные функции, ПТФ) (Boima, 2006; Wilding, Lin, 2006; Теории и методы..., 2007; Шейн и др., 1993). Это обстоятельство ставит перед исследователем задачу выбора наиболее адекватного метода получения экспериментального обеспечения модели.

Цель работы – количественная сравнительная оценка экспериментальных и расчетных динамических данных по влажности почвы в условиях безнапорной и слабонапорной инфильтрации и анализ наиболее подходящего для используемой модели (программы HYDRUS 1D) метода получения экспериментального обеспечения.

Задачи работы: экспериментальное исследование динамики влажности почвы при малонапорной и безнапорной инфильтрации и последующем испарении в полевых условиях; описание процесса влагопереноса с помощью физически обоснованной модели HYDRUS; анализ ошибок моделирования и обоснование оптимального способа получения гидрофизических свойств для прогнозных математических моделей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлась агродерново-подзолистая почва Зеленоградского стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева (Пушкинский район Московской области), некоторые физические свойства которой представлены в табл. 1.

В полевых условиях в 2010 и 2013 гг. изучали движение влаги по специальной методике на почвенных монолитах. Согласно схеме опыта подготовили два идентичных по размерам (диаметр 42 см) и почвам монолита. Боковые стенки монолитов обер-

Таблица 1. Физические свойства агродерново-подзолистой почвы (Зеленоградский стационар Почвенного института им. В.В. Докучаева, Пушкинский район, Московская область)

Глубина, см	Гранулометрический состав, % от массы образца			Плотность, г/см ³	Наименьшая влагоемкость, %	Коэффициент фильтрации, см/сут	С орг, %
	<0.002	0.002–0.05	>0.05				
0–5	10.50	84.78	4.72	1.37	31.1	21.6	1.23
5–10	10.79	86.27	2.94	1.36	27.4	21.6	1.18
10–20	11.39	87.70	0.91	1.34	26.5	21.6	1.26
20–30	11.13	87.49	1.38	1.49	24.2	21.6	1.00
30–40	10.99	86.61	2.40	1.52	21.3	12.0	0.23
40–50	10.03	85.44	4.53	1.55	23.7	12.0	0.18
50–60	10.37	86.48	3.15	1.56	24.3	12.0	0.14

нули пленкой и покрыли монтажной пеной, затем закопали для предотвращения боковых потерь влаги и тепла. Такая методика позволила точно соблюсти условие одномерного (вертикального) передвижения влаги в почвенном профиле и точно использовать все балансовые соотношения, так как за счет изоляции стенок были ликвидированы трудно учитываемые потери влаги на боковое растекание.

Эксперимент ставили так, что одновременно в обоих монолитах проводилось впитывание воды с поверхности, но в одном случае на поверхности поддерживали постоянный напор 5 см, а в другом впитывание воды было безнапорным (мелкодисперсное дождевание без образования слоя воды на поверхности). Предполагается, что при наличии даже небольшого (3–6 см водного столба) напора возможно изменение типа переноса влаги от капиллярного фронтального при ненапорном впитывании до инфлюкционного, по отдельным преимущественным путям переноса, при малонапорном впитывании (Умарова, 2011). Различие условий на верхней границе (безнапорная и малонапорная инфильтрация) должно было подтвердить/опровергнуть отмеченный ранее факт, что для формирования преимущественных потоков влаги, кроме наличия макропор, трещин и других присущих почве компонентов порового пространства, необходимым условием является наличие на поверхности почвы дополнительного гидравлического напора (Умарова, 2011).

В ходе эксперимента в монолитах ежедневно проводили послойное (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 см) бурение для изучения динамики влажности. В конце эксперимента по горизонтальной сетке на указанных глубинах отбирали образцы (25 экспериментальных точек на каждый слой) для определения пространственного распределения влажности. Испаряемость и испарение с поверхности почвы за весь период эксперимента определяли с помощью микроиспарителей.

Расчетное изучение движения влаги в условиях малонапорной и безнапорной инфильтрации проводили с помощью математической модели влагопереноса HYDRUS 1D. Для получения экспериментального обеспечения модели (прежде всего, ОГХ) использовали методы, приведенные в табл. 2 (Теории и методы ..., 2007; Шеин и др., 1995, 2001).

Таблица 2. Лабораторные эмпирические и расчетные по педотрансферным функциям (ПТФ) методы определения основной гидрофизической характеристики

Эмпирический метод	Полуэмпирический метод (восстановление ОГХ по гидрологическим константам и свойствам почв – ПТФ)
1. Метод капилляриметров 2. Метод тензиостатов 3. Метод центрифугирования	4. ПТФ, используемые в программе Agrotool (Полужков, Терлеев, 2002) 5. ПТФ на основе “секущих” по Воронину (Теории и методы ..., 2007) 6. По ПТФ из гранулометрического состава (база данных Rosetta, используемая в HYDRUS) (Van Genuchten, 1991) 7. Региональные ПТФ, полученные по полевым экспериментальным исследованиям физических свойств почв и лабораторным определениям ОГХ; эти ПТФ получены регрессионным методом на основании большого количества экспериментальных данных по дерново-подзолистым почвам Зеленоградского стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Одной из задач работы являлось моделирование указанных процессов, сравнение расчетных и экспериментальных данных для того, чтобы характеризовать, какое экспериментальное обеспечение модели является наиболее адекватным: ОГХ, полученная экспериментально вышеперечисленными (табл. 2) общепринятыми методами (методы 1–3), либо использование ПТФ (4–7).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределения влажности по профилю агродерново-подзолистой почвы доказывают, что при отсутствии напора на поверхности почвы влага после процесса инфильтрации продви-

нулась на глубину до 30 см, а при наличии гидравлического напора – до 40 см. Пространственное распределение влажности в конце эксперимента показывает, что при малонапорной инфильтрации статистические показатели варьирования влажности более значительны (на глубинах 50 и 60 см квартиль и размах составляли около 4–6 и 15–18%). Это связано с тем, что при малонапорной инфильтрации проявляются преимущественные потоки влаги. При этом влага переносится по отдельным водным “тяжам”, каналам макропор и трещинам. Формируется нестабильный фронт увлажнения, при котором движение воды является более быстрым, чем в основной массе почвы. Поэтому в нижней части профиля наблюдаются участки с повышенной влажностью. При безнапорной инфильтрации наблюдается меньшее варьирование влажности (на глубинах 50 и 60 см квартиль и размах составляли около 2–4 и 5–10%), так как вода медленнее движется по толще почвы и промачивает весь профиль равномерно.

Моделирование этих процессов в программе HYDRUS 1D показало, что при безнапорной фильтрации модель с введением ОГХ, полученной методами капилляриметров и тензиостатов, а также региональная ПТФ лучше других описывали поведение воды в почве. Средняя квадратическая ошибка моделирования в этих случаях была наименьшей, а для монолита с наличием напора на поверхности лучше всего подходит модель с введением ОГХ, полученной методом тензиостатов, а также с учетом гранулометрического состава.

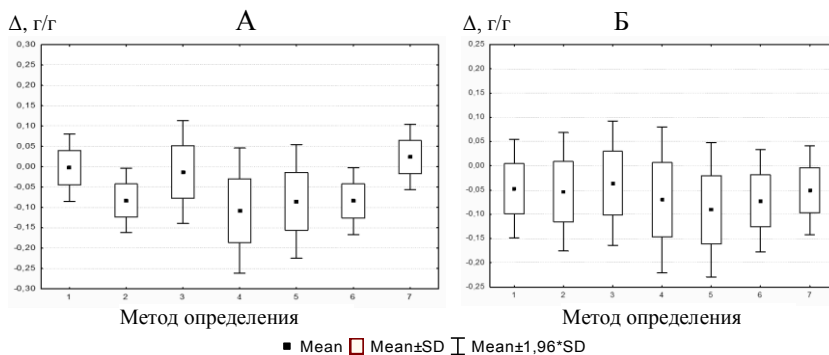
Вероятно, существенные ошибки при использовании в модели экспериментальной ОГХ, полученной центрифужным методом, вызваны тем, что при ее определении возникает большая экспериментальная погрешность, связанная с использованием нарушенных образцов небольшого размера и с недостаточно четким заданием начальных условий эксперимента (хранением образцов, их иссушением, различным предварительным насыщением образца водой). При методе тензиостатов используются образцы ненарушенного сложения, что обеспечивает более точное определение гидрофизической характеристики почвы. Использование ПТФ на основе стабильного и точного метода определения гранулометрического состава дает более достоверные результаты. Модель с использованием восстановления ОГХ по Воронину в качестве экс-

периментального обеспечения и метод центрифугирования не позволили достичь высоких совпадений с экспериментом.

Статистический анализ погрешностей моделей (суммарные ошибки расчета влажности по всему профилю, т.е. по всем исследованным слоям монолита) показал, что в случае безнапорной инфильтрации наименьшие ошибки и их разброс возникают при использовании данных региональной ПТФ (рисунок).

Для малонапорной инфильтрации наименьшие суммарные ошибки моделирования и их варьирование наблюдаются при использовании ПТФ гранулометрического состава. Среди экспериментальных методов получения ОГХ также наилучшим оказывается метод тензиостатов. Наибольший разброс значений ошибок наблюдался при использовании метода центрифугирования в обоих случаях задания условий на верхней границе почвенного профиля.

Отметим также, что отклонение среднего погрешностей от нуля указывает на возможное наличие систематических ошибок: по-видимому, в случае безнапорной инфильтрации этот тип ошибок наиболее вероятен при использовании ПТФ по гранулометрическому составу, “секущих” по Воронину и экспериментального центрифужного метода, а при напорной инфильтрации моделирования – при использовании в качестве предиктора гранулометри-



Статистики ошибок моделирования (разница реальной и расчетной влажности, Δ, г/г) при безнапорной (А) и малонапорной инфильтрации (Б) для агродерново-подзолистых почв при использовании различного экспериментального обеспечения (метод определения ОГХ см. табл. 2).

ческого состава и при использовании региональной ПТФ. Подчеркнем, что требуются дополнительные исследования и расчеты для окончательных выводов о наличии систематических ошибок при использовании различного экспериментального обеспечения в прогнозных модельных расчетах водного режима.

Сравнение моделей по непараметрическому критерию Вильямса–Клюта показало, что наилучшим экспериментальным обеспечением математической модели HYDRUS 1D является использование региональных ПТФ.

На основании проведенных исследований можно дать следующую методическую рекомендацию для исследователей водного режима почв: при региональных исследованиях, прогнозах, оптимизации водного режима почв необходимо создавать собственные региональные гидрологические базы данных, которые, даже в случае небольшого количества предикторов (как в данном случае, лишь плотность и содержание органического вещества), позволяют получать с помощью физически обоснованных моделей достаточно точное и надежное описание одномерного водного режима в масштабе почвенного профиля.

ВЫВОДЫ

1. Перенос влаги в почве существенно различен даже при небольших изменениях условий на верхней границе, прежде всего, за счет различий в механизме влагопереноса. При наличии напора воды в почве могут возникать преимущественные потоки влаги, что существенно меняет физический механизм влагопереноса и, соответственно, математическое описание и используемые модели.

2. Разное экспериментальное обеспечение дает достоверно различные ошибки моделирования. Все исследованные методы получения ОГХ дают большой разброс погрешностей моделирования. Среди экспериментальных методов наименьшие ошибки возникают при использовании метода капилляриметров и тензиостатов, а при использовании ПТФ – в случае региональной ПТФ с предикторами в виде гранулометрического состава, плотности почв и содержания органического вещества.

3. Наиболее адекватным экспериментальным обеспечением математической модели HYDRUS 1D для описания процес-

сов безнапорной и малонапорной инфильтрации и последующего перераспределения влаги в почвенном профиле является использование региональных ПТФ.

Предложен подход по сравнительной оценке различных методов получения гидрофизической информации для процесса точного прогнозного моделирования в масштабе педона. Следует отметить, что все результаты приводятся только для одного типа почв, поэтому нельзя с уверенностью утверждать о пригодности аналогичных данных для других почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986.
2. *Глобус А.М.* Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 356 с.
3. Теории и методы физики почв / Под ред. Шеина Е.В., Карпачевского Л.О. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
4. *Трошина О.А.* Физические свойства и элементы гидротермического режима комплексного почвенного покрова Владимирского ополья (на примере сельскохозяйственного поля ВНИИСХ): Автореф. дис. ... к.б.н. М., 2009. 30 с.
5. *Умарова А.Б.* Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 266 с
6. *Шеин Е.В., Архангельская Т.А., Гончаров В.М., Губер А.К., Початкова Т.Н., Сидорова М.А., Смагин А.В., Умарова А.Б.* Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001.
7. *Шеин Е.В., Гудима И.И., Мокеичев А.В.* Методы определения основных гидрофизических функций для целей моделирования // Вест. Моск. ун-та. Сер.17, почвоведение. 1993, № 2. С. 18–24.
8. *Шеин Е.В., Кокорева А.А., Горбатов В.С., Умарова А.Б., Колупаева В.Н.* Оценка чувствительности, настройка и сравнение моделей миграции пестицидов в почве по данным лизиметрического эксперимента // Почвоведение. 2009. № 7. С. 824–833.
9. *Шеин Е.В., Пачепский Я.А., Губер А.К., Чехова Т.И.* Особенности экспериментального определения гидрофизических и гидрохимических параметров математических моделей влаго- и солепереноса в почвах // Почвоведение. 1995. № 12. С. 1479–1486.
10. *Шеин Е.В., Спиридонов Ю.А., Сметник А.А.* Миграция пестицидов в почвах. М., 2005. 336с.

11. *Bouma J.* Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research // *Geoderma*. 2006. Vol. 131. P. 275–280.
12. Catchment water balance modelling in Australia 1960–2004 // *Bougon. Agricultural Water management*. 2005. Vol. 71. P. 91–116
13. *Harou J.J., Pulido-Velazkes M., Rosenberg D.E., Azuara J.M., Lund J.R., Hiwitt R.E.* Hydro-economic models: Concepts, design, application and future prospects // *J. Hydrology*. 2009. Vol. 375. P. 627–643.
14. *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 Agronomy Soil Sci*. 2002. Vol. 48, Issue 6. P. 609–635.
15. *Šimůnek J., van Genuchten M. Th. and Šejna M.* The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Department of environmental sciences university of California Riverside, 2005.
16. *Van Genuchten M.T., Leij and Yates SR.* The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, US Salinity Lab, Riverside, CA (1991).
17. *Wilding L.P., Lin H.* Advancing the frontiers of soil science towards a geo-science // *Geoderma*. 2006. Vol. 131. P. 257–274.

HYDRO-DEPOSITARY AND HYDRO-TRANSMITTING PROPERTIES OF SODDY-PODZOLIC SOILS IN THE COURSE OF SIMULATING THE WATER TRANSFER BY PHYSICALLY-GROUNDED MODELS

**E. V. Shein^{1,2}, E. B. Skvortsova², S. S. Panina¹,
A. B. Umarova, K. A. Romanenko²**

¹ *Lomonosov Moscow State University Faculty of Geography, 119991,
Russia, Moscow, 1 Leninskiye Gory
e-mail: evgeny.shein@gmail.com*

² *V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 119017 Russia, Moscow, Pyzhevskii 7, bld. 2*

The results of field experiments conducted on the medium loamy agro soddy-podzolic soil showed that due to the hydraulic head of water at the soil surface the moisture movement occurs predominantly through migration ways that deteriorate the hydro-depositary properties of soils. The moisture movement was studied by a special method performed in two soil monoliths identical in size (42 cm in diameter and 60 cm high). The monolith walls were covered by a film, foamed and buried

with the view of avoiding the lateral water loss. Both monoliths were simultaneously saturated with water: one of them was under a constant head of water in 5 cm, the other monolith was watered by fine-dispersed sprinkler without the formation of the water layer at the soil surface. The study was aimed at modeling the water movement under conditions of small headed infiltration and without the head of water as well as comparing the calculated and experimental data with the view of assessing the most adequate experimental provision of the model – the major hydrophysical characteristics obtained by empiric methods in the experiment or those calculated on the basis of hydrological constants and soil properties (pedo-transmitting functions). It seemed reasonable to establish that the experimental provision of the model can be shown in the following order: the use of regional pedo-transmitting functions provides better results as compared to the major hydrophysical characteristics, the latter being obtained by the method of tensiometers and capillarimeters is better than the pedo-transmitting characteristics used the particle-size distribution as a predictor in Agrotool program (ROSETTA database) as well as those obtained by Voronin's "secants".

Keywords: soil hydrophysics, mathematical model, experimental provision, pedo-transmitting functions.