

*На правах рукописи*

**Панина София Сергеевна**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕ-  
ДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ В ПОЧВЕ ПРИ МАЛОНАПОРНОЙ И БЕЗНАПОР-  
НОЙ ИНФИЛЬТРАЦИИ**

Специальность 06.01.03 –агрофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

**Научный руководитель:** Шеин Е.В., д.б.н., профессор, заведующий кафедрой физики и мелиорации почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**Официальные оппоненты:** Мазиров М.А., д.б.н., профессор, заведующий кафедрой земледелия и методики опытного дела факультета агрономии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева»

Скворцова Е.Б., д.с.-х.н., заведующая лабораторией физики и гидрологии почв ФБГНУ Почвенный институт имени В.В.Докучаева

**Ведущая организация:** ФБГНУ Владимирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (ФБГНУ "Владимирский НИИСХ")

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015г. в 15 ч 30 мин в аудитории М-2 на заседании Диссертационного совета Д 501.002.13 при МГУ имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д.1, стр.12, факультет почвоведения, тел/факс (495) 939-09-89.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, 27, отдел диссертаций) и на сайте <http://soil.msu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Приглашаем вас принять участие в обсуждении диссертации на заседании Диссертационного совета. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по вышеуказанному адресу.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 501.002.13

*Зенова*

Зенова Г.М.

**Актуальность исследований.** Движение воды и растворенных веществ являются основной функционирования почвы. Поэтому количественное изучение явлений переноса – это одна из важнейших задач физики почв. В современной гидрологии почв большое внимание уделяется ряду почвенных явлений, в частности «преимущественным потокам влаги», формирующимся в структурных почвах, с которыми переносится до 80-95% движущихся в почве веществ (Дмитриев, 2000; Шеин, 2009; Умарова, 2011 и др). К настоящему времени остаются неясными многие вопросы: имеет ли значение гидравлический напор на поверхности почвы для появления преимущественных потоков? Какое почвенное экспериментальное обеспечение лучше использовать для описания процессов переноса в этих условиях? Подходит ли традиционное экспериментальное обеспечение для описания процессов переноса в почве при наличии напора и при его отсутствии? И много других, в том числе методических вопросов. Это формирует цель и задачи работы.

**Целью исследования** является экспериментальное количественное исследование и описание влагопереноса в почвах с помощью традиционных физически обоснованных моделей (программа HYDRUS 1D) при различном экспериментальном почвенном обеспечении и различных условиях на верхней границе.

**Задачи исследования:**

- 1) экспериментальное исследование физических, гидрофизических свойств почв, необходимых для количественного описания влагопереноса и расчета педотрансферных функций (ПТФ);
- 2) полевые экспериментальные исследования динамики влажности почвы при малонапорной и безнапорной инфильтрации при впитывании, перераспределении влаги в почве и последующем испарении;
- 3) описание процесса влагопереноса с помощью физически обоснованной модели HYDRUS при использовании различного почвенного экспериментального обеспечения: лабораторные определения ОГХ разными методами, применение ПТФ);
- 4) анализ ошибок моделирования;
- 5) обоснование оптимального способа получения гидрофизического экспериментального обеспечения для прогнозных математических моделей.

**Научная новизна.** На основании полевых и лабораторных экспериментов, статистического анализа данных расчетных и экспериментальных опытов рекомендовано экспериментальное обеспечение для наилучшего описания этого процесса и моделирования его в программе HYDRUS. Доказано, что наиболее адекватным экспериментальным обеспечением математической модели HYDRUS 1D для описания процессов безнапорной и малонапорной инфильтрации и последующего перераспределения влаги в почвенном профиле является

использование экспериментальных ОГХ, полученных капилляриметрическим методом в зондовом варианте, и ПТФ, рассчитанных на основе региональной базы данных.

**Практическая значимость.** Проведенные исследования могут являться основой при выборе экспериментального обеспечения для адекватного физически обоснованного моделирования процесса переноса влаги и растворенных веществ при наличии малых напоров и при безнапорной инфильтрации и движения влаги в структурных почвах.

**Апробация работы.** Материалы по теме диссертации были доложены автором на Международной научной конференции «XIV Докучаевские молодежные чтения» (Санкт-Петербург, 2011), XVIII международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2011), Международной научной конференции «XV Докучаевские молодежные чтения» (Санкт-Петербург, 2012), VI Съезде общества почвоведов им. В. В. Докучаева» (Петрозаводск, 2012) и на заседаниях кафедры физики и мелиорации почв.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 6 статей (из них три статьи в издании, включенном в список ВАК) и 4 тезисов.

**Объем и структура диссертации.** Материалы диссертации изложены на 138 страницах текста, содержит 35 рисунков и 28 таблиц. Список литературы включает 183 источников, в том числе 79 на иностранном языке.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.б.н., профессору Шеину Е. В., а также сотрудникам факультета почвоведения МГУ за помощь, оказанную на разных этапах выполнения работы: к.б.н., доценту Шварову А. П., д.б.н., доценту Умаровой А. Б., к.б.н., с.п. Початковой Т. Н. Особую благодарность автор выражает к.б.н. Медко Н. А., к.б.н. Шуршину К. А.

## Глава 1. Состояние проблемы

Проблемы детального изучения и прогноза передвижения веществ в почвах в настоящее время являются чрезвычайно актуальными. Это связано прежде всего с тем, что на современном этапе развития агрофизики необходимо точно знать и количественно прогнозировать развитие того или иного природного процесса, чтобы своевременно и точно решить вопрос об управлении им. Вопросы управления всегда опираются на предварительные прогнозные расчеты, которые выполняются на основании математических моделей. Сейчас процедура прогнозного моделирования является обязательной при регистрации пестицидов (Шеин и др., 2009; Шеин и др., 1995), при прогнозе явлений затопления, разработке систем

городского и сельскохозяйственного водоснабжения, управлении водными ресурсами и пр. (Зайдельман, 2001; Bougton, 2005). Считается, что на данный момент управление водопользованием направлено не на строительство новых систем, а на точное управление существующими (Шеин, 2005; Julien Harou et al., 2009).

Основные трудности в применении математических физически обоснованных моделей связаны, прежде всего, с получением адекватного экспериментального материала по гидрофизическим свойствам почв (Шеин, Гудима, Мокеичев, 1993; Шеин и др., 1995). 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, основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) или функция водоудерживания, а также функция влагопроводности. Современная физика почв использует разнообразный набор методов для определения ОГХ: это и прямые экспериментальные определения с помощью различных методов (Вадюнина, Корчагина, 1986; Глобус, 1969; Шеин и др., 2007; Шеин и др., 2009), и различные расчетные методы (педотрансферные функции) (Шеин и др., 2001; Bouma, 2006; Wilding, Lin, 2006). Поэтому важно выбрать наиболее адекватный и в тоже время общедоступный метод получения экспериментального обеспечения модели.

## Глава 2. Объекты и методы исследований

Первым объектом послужила серая лесная среднесуглинистая почва на карбонатных лессовидных суглинках, расположенная во Владимирском ополье. Эти почвы детально описаны в литературе (Кирюшин, 2004; Шеин, Марченко, 2001).

Некоторые физические свойства, которые использовались в дальнейшем для расчета педотрансферных функций, представлены в табл. 1

Табл. 1

Физические свойства серой лесной почвы

Глубина	Гранулометрический состав			Плотность, г/см <sup>3</sup>	НВ, %	Коэффициент фильтрации, см/сут	Содержание С <sub>орг</sub> , %
	<0.002	0.002-0.05	>0.05				
0-5	17,39	80,66	1,95	1,10	37,34	60	1,91
5-10	17,35	80,21	2,44	1,16	37,21	58	1,86
10-20	17,21	80,00	2,79	1,21	37,08	52	1,78
20-30	17,63	81,62	0,75	1,33	38,58	26	1,76
30-40	16,00	82,43	1,57	1,36	38,20	32	1,63
40-50	17,35	81,76	0,89	1,33	37,37	35	1,42
50-60	17,32	82,09	0,59	1,39	35,26	35	0,72

В рамках данного исследования проводилось экспериментальное (полевой опыт) и расчетное (использование прогнозной математической модели) изучение движения влаги в условиях малонапорной и безнапорной инфильтрации.

В полевых условиях изучалось движение влаги по специальной методике на почвенных монолитах. Согласно схеме опыта были подготовлены два идентичных по размерам (диаметр 42 см) и почвам монолита. Боковые стенки монолитов были обернуты пленкой и покрыты монтажной пеной, затем закопаны 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 трудноучитываемые потери влаги на боковое растекание.

Эксперимент ставился 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 (Шеин, 2005), что для формирования преимущественных потоков влаги, кроме наличия макропор, трещин и других присущих почве особенностей порового пространства, необходимым условием является наличие на поверхности почвы дополнительного гидравлического напора.

Для изучения динамики влажности в монолитах ежедневно проводили послойное бурение (на глубинах 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 см). 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 небольших (около 83 см<sup>3</sup>) монолитов.

Вторым объектом была дерново-подзолистая почва Зеленоградского стационара Почвенного института имени В.В. Докучаева в районе села Ельдигино.

Был проведен эксперимент, аналогичный вышеописанному (на серой лесной почве). Но в данном случае поверхность монолитов поливали раствором бриллиантового голубого для визуализации путей миграции влаги.

Некоторые физические свойства дерново-подзолистых почв представлены в табл.2

Табл. 2

Физические свойства дерново-подзолистой почвы (зеленоградский опорный пункт Почвенного института имени В.В.Докучаева, Пушкинский р-н, Московская обл.)

Глубина	Гранулометрический состав			Плотность, г/см <sup>3</sup>	НВ, %	Коэффициент фильтрации, см/сут	Содержание С <sub>орг</sub> , %
	<0.002	0.002-0.05	>0.05				
0-5	10,50	84,78	4,72	1,37	31,10	21,6	1,23
5-10	10,79	86,27	2,94	1,36	27,40	21,6	1,18
10-20	11,39	87,7	0,91	1,34	26,45	21,6	1,26
20-30	11,13	87,49	1,38	1,49	24,20	21,6	1,00
30-40	10,99	86,61	2,40	1,52	21,30	12	0,23
40-50	10,03	85,44	4,53	1,55	23,70	12	0,18
50-60	10,37	86,48	3,15	1,56	24,30	12	0,14

Одной из задач работы является моделирование указанных процессов, сравнение расчетных и экспериментальных данных для того, чтобы характеризовать, какое экспериментальное обеспечение модели является наиболее адекватным: ОГХ, полученная экспериментально нижеперечисленными общепринятыми методами, либо использование ПТФ и какого типа из нижеприведенных (1-4) полуэмпирических подходов.

Расчётное изучение движения влаги в условиях малонапорной и безнапорной инфильтрации проводили с помощью математической модели влагопереноса HYDRUS 1D (van Genuchten et al., 1991; Simunek et al., 2009). Для получения экспериментального обеспечения модели (прежде всего, ОГХ) использовались следующие методы (Шеин, 2007; Шеин, Гудима, Мокеичев, 1993):

- I. Эмпирические методы:
  1. Метод капилляриметров в зондовом варианте (Шеин и др., 2007);
  2. Метод тензиостатов;
  3. Метод центрифугирования (Смагин, 2005).
- II. Полуэмпирические методы (восстановление ОГХ по гидрологическим константам и свойствам почв – педотрансферные функции, ПТФ):
  1. ПТФ, используемая в программе Agrotool (Poluektov et al., 2002), основанная на экспериментальных данных по НВ и ВЗ;
  2. ПТФ на основе метода «секущих» по Воронину (Шеин и др., 2007);
  3. По ПТФ с использованием гранулометрического состава (база данных ROSETTA, используемая в HYDRUS);
  4. По региональной ПТФ. Эта ПТФ была получена регрессионным методом на основании большого количества экспериментальных данных по ком-

плексу данных почв. Для серых лесных почв использовались данные по плотности почвы, содержания органического вещества и ОГХ, полученной капилляриметрическим методом (Трошина, 2009), а для дерново-подзолистых почв использовались еще и данные по гранулометрическому составу.

### Глава 3. Результаты и обсуждения

В результате проведения полевого заливочного эксперимента была получена динамика влажности почвы по профилю монолитов.

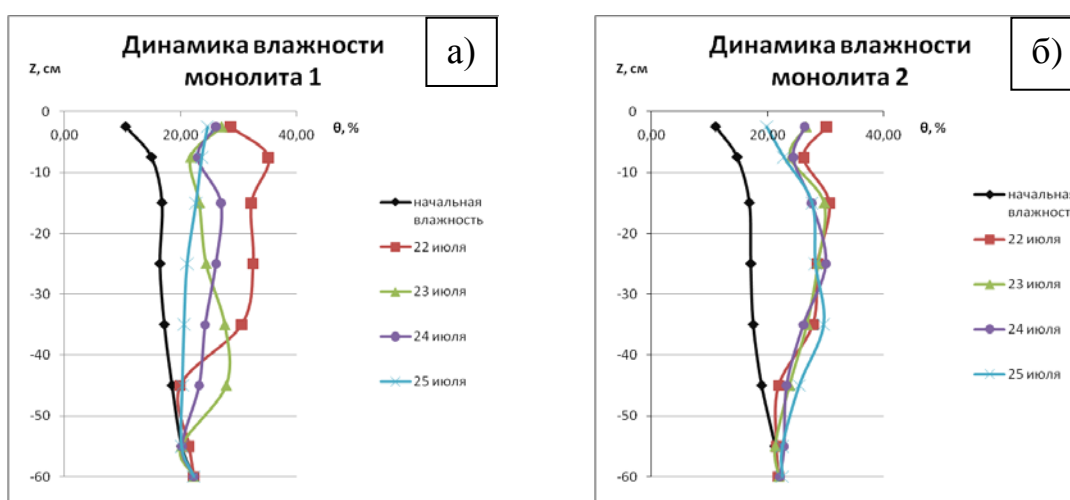


Рис. 1. Распределение влажности по профилю серой лесной почвы до и после полива (а – при безнапорной фильтрации, б - при малонапорной фильтрации).

Распределения влажности по профилю серой лесной почвы показали, что при отсутствии напора на поверхности почвы сначала увлажнились верхние слои, а затем вода постепенно переместилась вниз по профилю. На последние сутки после процесса инфильтрации влага продвинулась на глубину до 30 см влага (рис. 1). А в монолите с напорной инфильтрацией не наблюдалось значительных изменений в показаниях влажности во времени. При наличии гидравлического напора вода, по-видимому, быстрее двигалась по путям преимущественного потока, макропорам и трещинам. На графике видно, что уже на следующие сутки профиль увлажнился до 40 см. А в последующие дни влага уже незначительно перемещалась вниз по профилю.



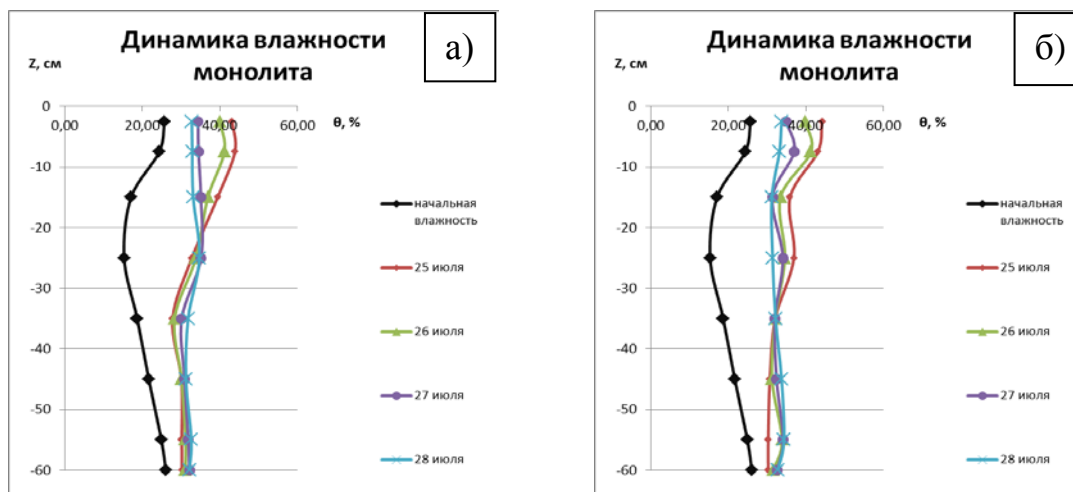


Рис. 2. Распределение влажности по профилю дерново-подзолистой почвы до и после полива (а – при безнапорной фильтрации, б - при малонапорной фильтрации).

Аналогичная ситуация наблюдалась и для дерново-подзолистой почвы (рис. 2). В первые сутки при безнапорном поливе увлажнились только верхние слои, а затем вода постепенно уходила вниз. При наличии гидравлического напора на поверхности почвы влага продвинулась в первые же сутки до 30 см.

После проведения фильтрационного эксперимента послойно (на глубине 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50 см) снимаются слои монолита и с помощью микробура снимаются по сетке (25 образцов с каждого слоя) показания влажности (микропробы) для исследования пространственного распределения влаги.

Мы исходили из предположения, что при напорной фильтрации, движение влаги будет осуществляться по макропорам и трещинам, которые при ненапорной фильтрации проявляться не будут. Вследствие проявления гидрологической роли макропор и трещин при напорной фильтрации вода будет распределена на определенных глубинах более неравномерно: будут проявляться зоны, приуроченные к преимущественным потокам, транспортные, которые должны быть увлажненными. Должны существовать и зоны более сухие, в которые влаги за счет горизонтального рассасывания проникала медленно. Они будут оставаться более сухими. Вследствие этих процессов варьирование влажности на соответствующих глубинах при малонапорной фильтрации должно быть большим.

Анализ топоизоплет значений влажности (рис. 3) показал, что наибольшим варьированием значений влажности (особенно в нижних слоях) характеризуется монолит с наличием напора на поверхности. Это связано, скорее всего, с преимущественными потоками при малонапорной инфильтрации.

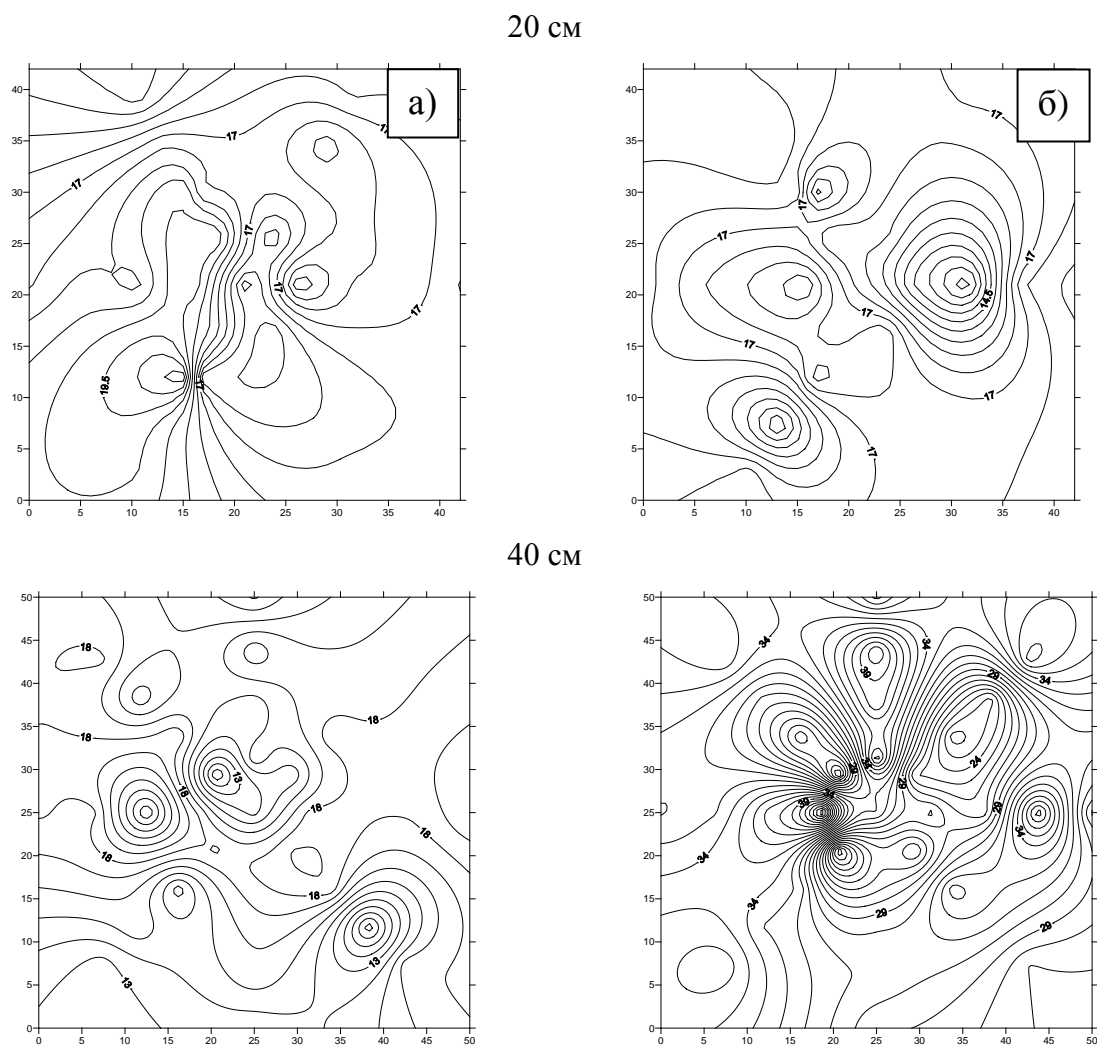


Рис. 3. Пространственное варьирование влажности серой лесной почвы через 5 суток после полива (а – при безнапорной фильтрации, б - при малонапорной фильтрации) на глубинах 20 см и 40 см.

В случае дерново-подзолистой почвы наблюдаются большие участки увлажнения (голубая окраска) на глубине после инфильтрации при напоре (рис. 4). Это связано с формированием преимущественных путей при миграции, что и приводит к формированию увлажненных и сухих зон в почве. При отсутствии напора вода увлажнила только верхние слои.

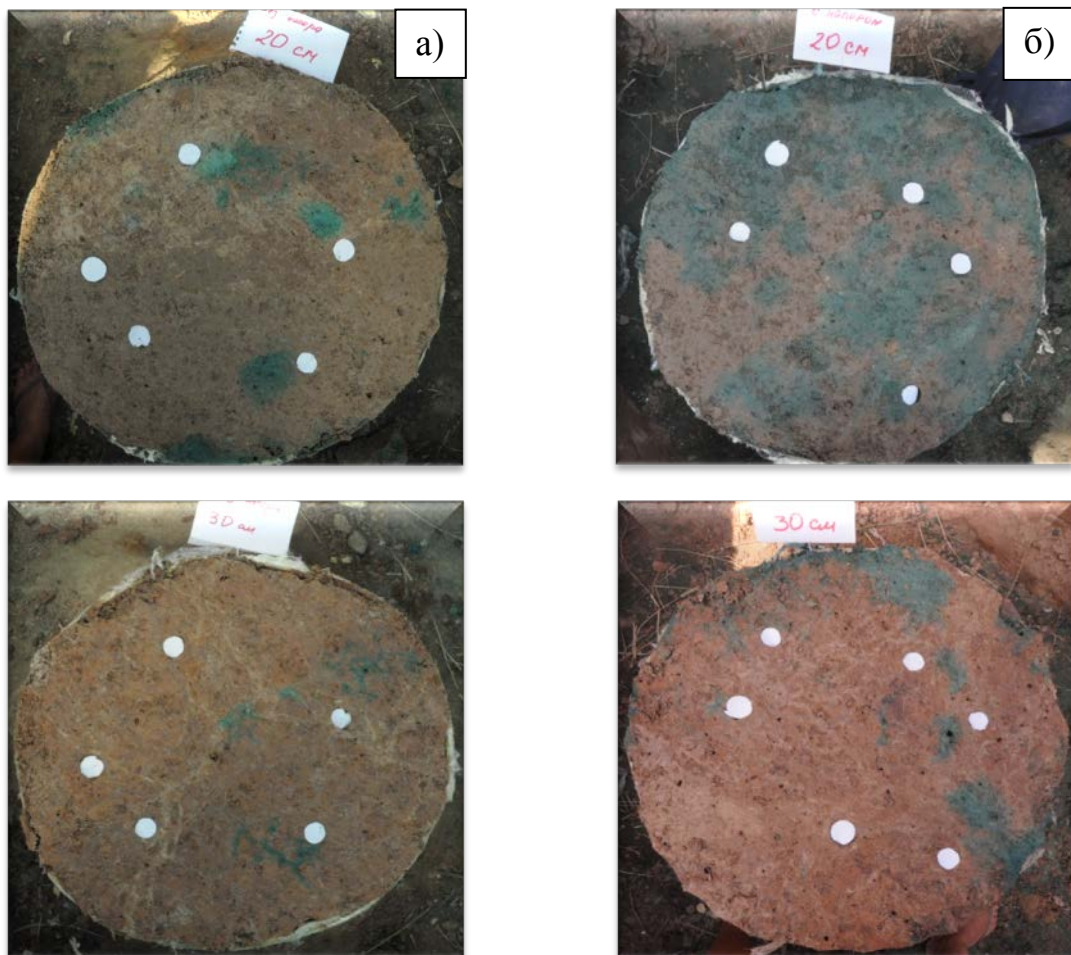


Рис. 4. Пространственное варьирование влажности дерново-подзолистой почвы через 5 суток после полива (а – при безнапорной фильтрации, б - при малонапорной фильтрации) на глубинах 20 и 30 см.

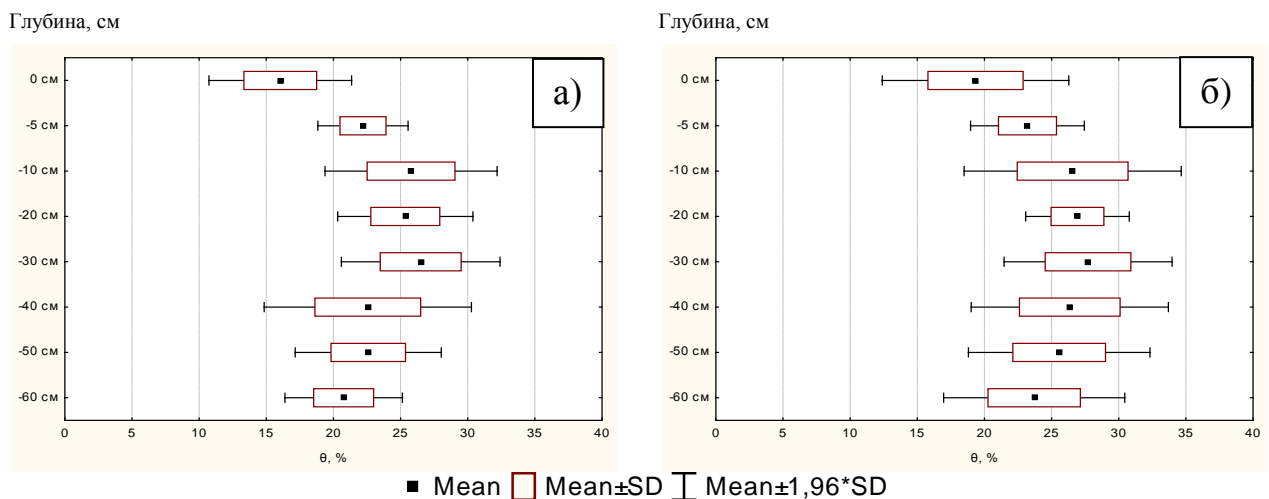


Рис. 5. Статистики распределения влажности по слоям профиля серой лесной почвы через 5 суток после полива (а – при безнапорной фильтрации, б - при малонапорной фильтрации).

Пространственное распределение влажности по профилю серых лесных почв в конце эксперимента (рис. 5) показывает, что при наличии напора наблюдается широкие характери-

стики варьирования влажности. Широкие характеристики минимума и максимума, особенно в нижней части профиля (на глубинах 50 и 60 см квартиль и размах составляли около 4-6 и 15-18%), свидетельствуют о том, что при малонапорной инфильтрации возникают преимущественные потоки влаги по отдельным, наиболее крупным порам. Поэтому вода движется неравномерно, формируются участки с повышенным увлажнением и сухие зоны. При отсутствии напора на верхней границе наблюдается меньшее варьирование влажности по профилю почвы (на глубинах 50 и 60 см квартиль и размах составляли около 2-4 и 5-10%).

Для дерново-подзолистых почв пространственное распределение влажности по профилю так же показывает, что при малонапорной инфильтрации статистические показатели варьирования влажности более значительны (на глубинах 40 и 50 см размах составил около 15-17%). Это подтверждает, что при наличии напора на поверхности почвы 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 глубине 50 см квартиль и размах составляли около 2-4 и 7-12%), так как вода медленнее и равномернее движется по толще почвы и промачивает весь профиль равномерно.

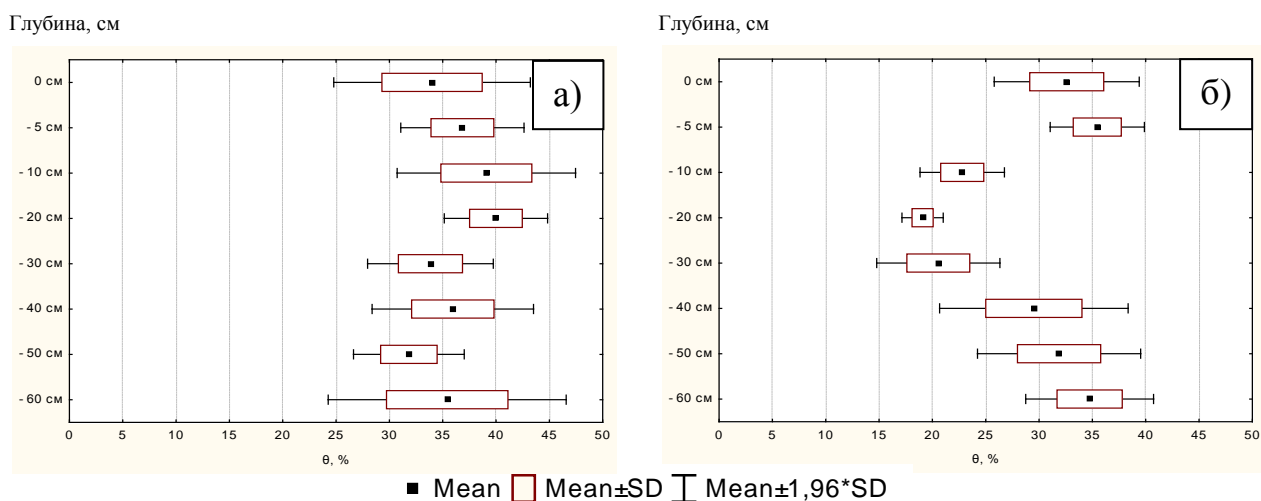


Рис. 6. Статистики распределения влажности по слоям профиля дерново-подзолистой почвы через 5 суток после полива (а – при безнапорной фильтрации, б - при малонапорной фильтрации).

Сравнение влажности по слоям влажности для 2-х монолитов по t-критерию показало достоверность отличий между распределениями влаги после фильтрационного эксперимента при различных условиях на верхней границе.

Моделирование этих процессов в программе HYDRUS 1D показало, что для серых лесных почв при безнапорной фильтрации модель с введением ОГХ, полученной методами капилляриметров и тензиостатов, а также региональная ПТФ лучше других описывало поведение воды в почве, — среднеквадратическая ошибка моделирования в этих случае была наименьшей, а для монолита с наличием напора на поверхности так же лучше всего подходят модели с введением ОГХ, полученной методом тензиостатов и капилляриметров, а также из ПТФ на основании гранулометрического состава (табл.3).

Вероятно, существенные ошибки при использовании в модели экспериментальной ОГХ, полученной центрифужным методом связано с тем, что при определении ОГХ 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. Стабильный и точный метод определения гранулометрического состава дает более достоверные результаты.

Табл. 3

Среднеквадратические ошибки моделирования при использовании различного экспериментального обеспечения

Вариант экспериментального обеспечения	Способ получения ОГХ	Среднеквадратическая ошибка			
		серая лесная почва		дерново-подзолистая почва	
		при безнапорном поливе	при малонапорном поливе	при безнапорном поливе	при малонапорном поливе
(1) Метод капилляриметров	экспериментальный	0,0586	0,0541	0,0418	0,0696
(2) Метод тензиостатов	экспериментальный	0,0536	0,0335	0,0918	0,0814
(3) Метод центрифугирования	экспериментальный	0,0856	0,0862	0,0651	0,0739
(4) По программе Agrotool	ПТФ на основе данных по НВ* и ВЗ*	0,0649	0,0541	0,0986	0,1054
(5) Метод «секущих» по Воронину	На основе данных по порозности, НВ и ВРК*	0,0863	0,0794	0,1104	0,1145
(6) По ПТФ на основании гранулометрического состава	По базе данных ROSETTA (в HYDRUS)	0,0724	0,0345	0,0939	0,0896
(7) Региональная ПТФ	По данным для почв на основе плотности и содержания органического вещества и гран.состава	0,0473	0,0581	0,0470	0,0684

\*НВ – наименьшая влагоемкость, ВЗ – влажность завядания, ВРК – влажность разрыва капилляров.

Для дерново-подзолистых почв при безнапорной фильтрации лучше всего подходит модель с использованием ОГХ, полученной методом капилляриметров и региональной ПТФ (табл. 3). При наличии напора на поверхности дерново-подзолистой почвы модели хуже (с большой среднеквадратической ошибкой) воспроизводят поведение воды в почве.

Статистический анализ погрешностей моделей (суммарные ошибки расчета влажности по всему профилю, т.е. по всем исследованным слоям монолита) показал, что для серой лесной почвы в случае безнапорной инфильтрации наименьшие ошибки и их разброс возникают при использовании данных ПТФ для Владимирского ополья (Трошина, 2009), а также при использовании ОГХ, полученной методом капилляриметров и тензиостатов (рис.7).

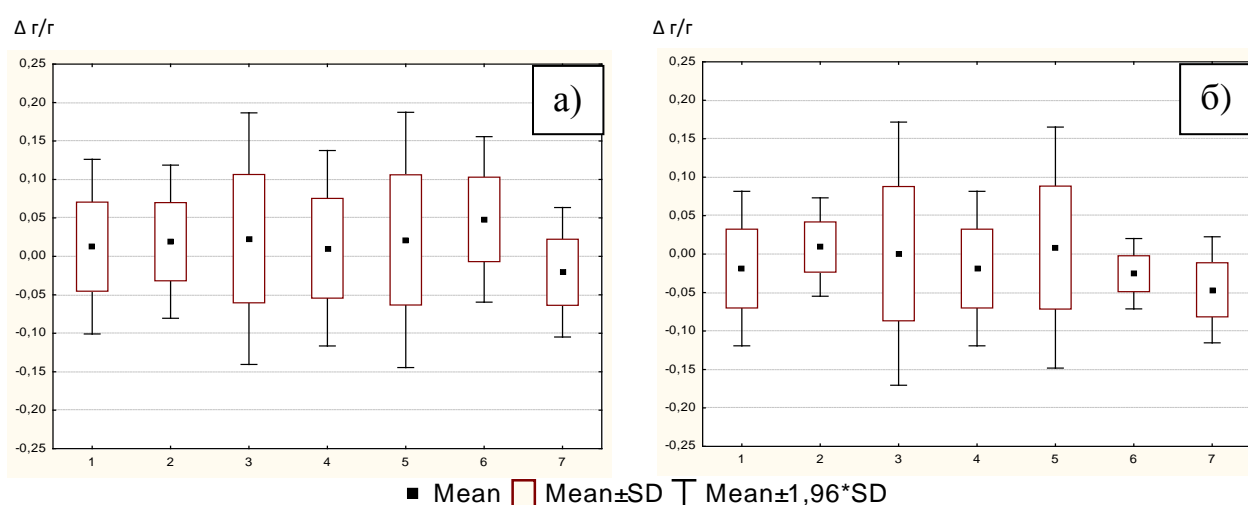


Рис. 7. Статистики ошибок моделирования (разница реальной и расчетной влажности, г/г) при безнапорной инфильтрации (а) и малонапорной инфильтрации (б) для серых лесных почв при использовании различного экспериментального обеспечения (цифрами 1, 2, 3 и т.д. по оси абсцисс обозначены методы определения ОГХ, - см. табл. 3).

Для малонапорной инфильтрации наименьшие суммарные ошибки моделирования и их варьирование наблюдаются при использовании ПТФ гранулометрического состава. Среди экспериментальных методов получения ОГХ в этом случае также наилучшим оказывается метод тензиостатов. Наибольший разброс значений ошибок наблюдается 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 (рис. 7).

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

Статистический анализ погрешностей моделей в случае для дерново-подзолистых почв показал, что при безнапорной инфильтрации наименьшие ошибки и их разброс возникают при использовании ОГХ, полученной методом капилляриметров (рис. 8). При наличии напора на поверхности почвы наблюдается отклонение среднего погрешностей от нуля. Это указывает на возможное наличие систематических ошибок. Можно сделать вывод, что для данной почвы все модели не могут правильно воспроизводить процесс движения влаги при малонапорной инфильтрации.

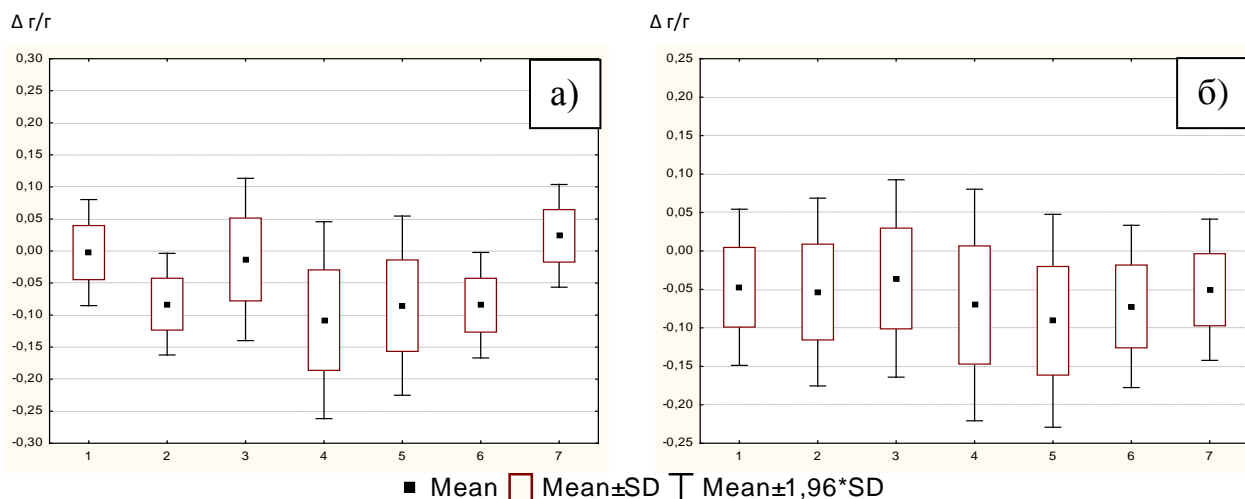


Рис. 8. Статистики ошибок моделирования (разница реальной и расчетной влажности, г/г) при безнапорной инфильтрации (а) и малонапорной инфильтрации(б) для дерново-подзолистых почв при использовании различного экспериментального обеспечения (цифрами 1, 2, 3 и т.д. по оси абсцисс обозначены методы определения ОГХ, - см. табл. 3).

Сравнение моделей по непараметрическому критерию Вильямса-Клюта показало, что наилучшим экспериментальным обеспечением математической модели HYDRUS 1D является ОГХ, полученная капилляриметрическим методом.

Статистический анализ моделей (сравнение по t-критерию) показал, что при различном экспериментальном обеспечении у большинства моделей достоверно отличаются ошибки.

Из проведенных исследований можно сделать следующий вывод и предложить следующую методическую рекомендацию для исследователей водного режима почв: при региональных исследованиях, прогнозах, оптимизации водного режима почв необходимо создавать собственные региональные гидрологические базы данных с ОГХ, полученной методом капилляриметров, которые, даже в случае небольшого количества предикторов (как в случае с серыми лесными почвами, 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.

## **Основные выводы:**

1. Были исследованы два типа почв серая лесная и дерново-подзолистая, для которых получены ПТФ на основании многочисленных экспериментальных исследований. Однако, если для серой лесной почвы было достаточно двух предикторов (плотность и содержание органического вещества), то для дерново-подзолистой – трех (ещё и гранулометрический состав), что связано с существенным изменением грансостава по профилю почвы. Профильные изменения грансостава, плотности, органического вещества следует учитывать при составлении региональной базы данных гидрофизических свойств.

2. Перенос влаги существенно различен даже при небольших изменениях условий на верхней границе, прежде всего за счет механизма переноса влаги. При наличии напора влаги на поверхности почвы могут возникать преимущественные потоки влаги, что существенно меняет физический механизм переноса влаги и, соответственно, математическое описание, используемые модели и экспериментальное обеспечение.

3. Разное экспериментальное обеспечение дает достоверно различные ошибки моделирования. Все использованные в модели HYDRUS1D ОГХ дают больший разброс погрешностей моделирования. Среди экспериментальных методов наименьшие ошибки возникают при использовании метода капилляриметров, а при применении ПТФ – в случае использования региональной ПТФ.

## **Заключение:**

Наиболее адекватным экспериментальным обеспечением математической модели HYDRUS 1D для описания процессов безнапорной и малонапорной инфильтрации и последующего перераспределения влаги в почвенном профиле является использование региональных ПТФ. Поэтому при стационарных исследованиях рекомендуется создавать региональную (для исследованной территории) базу данных с ОГХ, полученной методом капилляриметров и использовать для прогнозных расчетов водного режима ПТФ, полученные на основе множественной регрессии.

## **Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

### **В списке ВАК**

- Умарова А.Б., Шеин Е.В., Медко Н.Н., Панина С.С. Передвижение влаги в серой лесной почве в условиях напорного и не напорного впитывания// Вестник ОГУ №12 (118)/декабрь, 2010, с. 91-94.



- Панина С.С., Шеин Е.В. Передвижения влаги при малонапорной и безнапорной фильтрации// Вестник ОГУ № 12 (131), 2011, с. 114-116.
- Панина С.С., Шеин Е.В. Математические модели влагопереноса в почве: значение экспериментального обеспечения и верхних граничных условий// Вестник Московского Университета, №3, 2014, С. 45-50.
- Shein E.V., Dembovetsky A.V., Panina S.S. Modeling soil water movement under low head ponding and gravity infiltration using data determined with different methods// Procedia Environmental Sciences, 2013, №19, pp. 553-557.
- Shein E.V., Kukharuk N.S., Panina S.S. Soil water retention curve: experimental and pedo-transfer data to forecast water movement in soils // Biogeosystem Technique, 2014, №1, Vol. 1, pp. 89-96.
- Shein E.V., Panina S.S. Mathematical Models of Soil Moisture Transfer: Importance of Experimental Assurance and Upper Boundary Conditions // Moscow University Soil Science Bulletin, 2014, №1, Vol. 69, pp. 133-138.
- Панина С.С. Моделирование движения влаги и растворенных веществ в агросерой среднесуглинистой почве// Международная научная конференция «XIV Докучаевские молодежные чтения», Санкт-Петербург, 2011 г.
- Панина С.С. Моделирование движения влаги в агросерой среднесуглинистой почве// XVIII международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2011 г.
- Панина С.С. Моделирование передвижения веществ по профилю почвы при различных условиях на верхней границе// Международная научная конференция «XV Докучаевские молодежные чтения», Санкт-Петербург, 2012 г.
- Панина С.С. Моделирование движения веществ в условиях малонапорной и безнапорной фильтрации// «VI Съезд общества почвоведов им. В. В. Докучаева», Петрозаводск, 2012 г.