

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**Сорокина Наталья Владимировна**

**Гидротермические свойства органогенных почв  
(на примере эутрофных торфоземов Яхромской долины)**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова

**Научный  
руководитель**      *Шеин Евгений Викторович,*  
доктор биологических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты**      *Болотов Андрей Геннадьевич,*  
доктор биологических наук, доцент,  
ФГБНУ ФИЦ "Почвенный институт имени В.В.  
Докучаева", заместитель директора по науке и  
инновациям,  
*Зинченко Сергей Иванович,*  
доктор сельскохозяйственных наук, ФГБНУ  
«Верхневолжский федеральный аграрный научный  
центр», заведующий отделом агрофизики почвы,  
заместитель директора по научной работе  
*Рыжова Ирина Михайловна,*  
доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра  
общего почвоведения, профессор

Защита диссертации состоится «06» июня 2023 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.2 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В.Ломоносова, биологический факультет, аудитория 389.

E-mail: [nvkostina@mail.ru](mailto:nvkostina@mail.ru), тел.: 8 (495) 939 35 46

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/015.2/2522>

Автореферат разослан «28» апреля 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета МГУ .015.2,  
кандидат биологических наук

  
Н.В.Костина

## Общая характеристика работы

### Актуальность

Торфяные почвы активно используются в сельском хозяйстве, а также при создании целевых почвенных конструкций в качестве одного из слоев или в смеси с другими компонентами. Однако, эти почвы имеют свою специфику физических свойств, существенно отличную от минеральных: обладают высокой пористостью, набухают и подвержены усадке, что может приводить к существенным изменениям водоудерживающей способности в циклах увлажнения-иссушения, ведущей к проявлению выраженного влажностного гистерезиса. Это необходимо учитывать при расчетах водного режима, сроков и норм полива. При неправильном использовании торфяные почвы теряют свои благоприятные свойства, подвергаются ветровой и водной эрозии и быстрому разложению органического вещества (Зайдельман, 1988, 1991, 2014; Поздняков, Ковалев и др., 2014). Одним из факторов, лимитирующим биологическую активность и влияющим на процессы их деградации является тепло. Тесная взаимосвязь водных и тепловых свойств торфоземов, обуславливает актуальность анализа влияния влажностного гистерезиса на зависимость температуропроводности от влажности.

При вовлечении торфяных почв в сельскохозяйственное производство необходим научно обоснованный прогноз их трансформации на основе анализа тепло- и гидрофизических процессов. И если для минеральных почв основные процессы водо- и теплообмена весьма успешно прогнозируются и моделируются (Черноусенко, Судницын, 2019; van Genuchten, 1980), то для органогенных в настоящее время нет достаточного экспериментального обоснования для такого рода моделирования.

**Степень разработанности темы исследования.** Обзор литературы свидетельствует о том, что накоплено большое количество данных по исследованию водоудерживания почв, особенно минеральных (Роде, 1969; Глобус, 1969; Судницын, 1979; Neilsen et al., 1989; Neilsen, 1991; Умарова, 2008, 2011; Fariborz et al., 2012; Терлеев и др., 2021). Оценено влияние физических и химических свойств на положение кривой водоудерживания или так называемой основной гидрофизической характеристики (ОГХ) (Пузанова и др., 2014; Назарова, 2009). В литературе представлены исследования по определению кривой ОГХ для органогенных почв (Schwärzel et al., 2002; Bohlin et al., 2004; Моторин, 2017; Markoska et al., 2018; Bechtold et al., 2018). Однако, основные свойства, определяющие положение и форму ОГХ торфоземов мало изучены. Кроме того, в настоящее время практически отсутствует обоснование выделения основных

аргументов (предикторов) в виде свойств торфоземов для получения педотрансферных функций, что затрудняет использование современных прогнозных и управляющих моделей.

Отечественными и зарубежными авторами уделяется большое внимание исследованию тепловых свойств торфяных почв (Инишева, 2001; Gasparim et al., 2005; Rao et al., 2005; Weber et al., 2006; Danelichen et al., 2011; Danelichen, 2013; Dyukarev, 2019). Изучение этих свойств актуально не только для сельского хозяйства, но и для одной из важнейших современных проблем, происходящих с торфяными почвами — их пирогенной деградации.

#### **Цель и задачи исследования**

**Цель работы** - изучение основных физических, гидро- и теплофизических свойств и характеристик органогенных почв.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить основную гидрофизическую характеристику торфяных почв на образцах торфоземов разного генезиса, плотности, степени разложения, ботанического состава и зольности.
2. Определить и провести анализ влажностного гистерезиса торфяных почв различного генезиса, плотности и ботанического состава.
3. Изучить возможность проявления гистерезиса зависимости температуропроводности от влажности с учетом взаимосвязи водных и тепловых свойств почв.
4. Методом компьютерной томографии изучить изменение структуры порового пространства монолитов торфяных почв разного генезиса ботанического состава при их увлажнении.

**Научная новизна.** Впервые гидрофизические свойства и характеристики торфоземов исследованы в тесном анализе с их теплофизическими характеристиками. Установлено влияние плотности на положение и форму основной гидрофизической характеристики торфоземов различной плотности, зольности и ботанического состава. Гистерезис ОГХ обусловлен изменением структуры порового пространства торфоземов, что подтверждено методом компьютерной томографии и расчетом распределения пор по размерам.

**Теоретическая и практическая значимость работы** Полученные данные могут быть использованы для создания базы данных свойств органогенных почв как экспериментальной основы для расчетной оптимизации температурного и водного режимов и использования торфяных почв методами математического моделирования. Результаты могут быть полезны в сельскохозяйственном производстве при расчетах сроков и норм полива, а также при проектировании и осуществлении мелиоративных мероприятий по оптимизации водного и

теплового режимов торфоземов, создании почвенных конструкций, при прогностических расчетах и управлении гидрологическим и тепловым режимами торфоземов.

**Методология исследования.** Основой проводимого исследования в рамках диссертационной работы является системный подход, торфяная почва рассматривается как единая и целостная система, которая состоит из отдельных иерархически организованных подсистем (Воронин, 1984,1986; Розанов, 2004). Выбор методов исследования обусловлен традиционными подходами анализа функционального порового пространства, отраженного в водоудерживающей способности почв, и современного томографического метода изучения геометрических параметров пор.

**Защищаемые положения:**

1. Основное влияние на основную гидрофизическую характеристику торфоземов Яхромской долины оказывает плотность, зольность и степень разложения. Вклад плотности наибольший.

2. Для торфяных почв характерно явление влажностного гистерезиса ОГХ, связанного прежде всего с явлениями набуханиями и усадки, что подтверждается томографическими исследованиями ненарушенных образцов торфоземов. Гистерезис зависимости температуропроводности от влажности не выявлен.

3. Увлажнение почв, сопровождаемое их набуханием, ведет к выраженным изменениям структуры порового пространства торфоземов за счет роста макропористости. Увеличение объема макропор зависит от ботанического состава и сильнее всего выражено в гипновом торфоземе и древесном торфоземе, подстилаемом залежью травяного, осокового торфа.

**Степень достоверности и апробации работы.** Исследование проводилось с использованием современного оборудования и классических методов физики почв, которые при соответствующем количестве повторений доказали свою эффективность.

Результаты работы опубликованы в сборниках научных конференций: «Эффективное использование мелиорированных земель: проблемы и решения». Материалы Международной научно-практической конференции ФГБНУ ВНИИМЗ. Тверь, 28 сентября 2018 года; «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы». Сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения А.Д. Воронина, 2019; Международной научной конференции XXIII Докучаевские молодежные чтения «Почва в условиях глобального изменения климата», март 2020г; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 941, The International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Ecology, Transport and Agricultural Technologies" 26-27 June 2020, Barnaul,

Russian Federation.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа содержит 133 страницы, состоит из оглавления, введения, 3 основных глав: 1-я глава - обзор научной литературы, 2-я глава - характеристика исследуемых объектов и методов, 3-я глава - полученные результаты и их обсуждение, заключения, списка литературы из 130 источников, из которых 74 на иностранном языке. Диссертация содержит 5 таблиц, 25 рисунков и 7 формул, 17 страниц приложений.

**Личный вклад автора.** Заключается в анализе научной литературы по теме исследования, формулировке цели и задач работы, проведении полевых и лабораторных исследований, статистической обработке полученных экспериментальных данных, обобщении полученных данных, представлении результатов исследования на научных конференциях, подготовке публикаций в журналах и сборниках; в работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

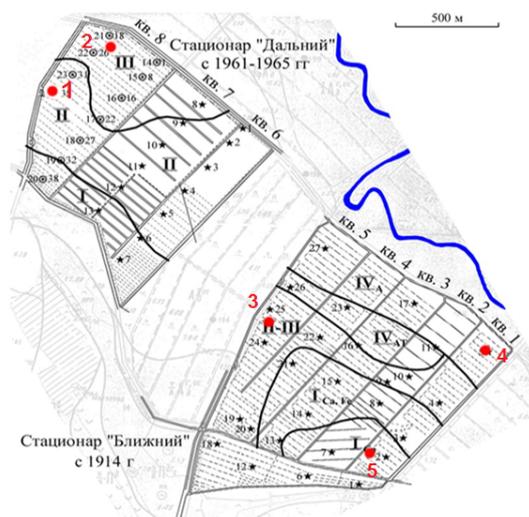
**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю профессору Евгению Викторовичу Шеину, за оказанную поддержку, мудрые советы и помощь на протяжении всего обучения; кафедре физике и мелиорации почв факультета почвоведения за помощь в проведении экспериментальной части работы, а также обсуждении и советы по работе, заведующей кафедрой профессору А.Б. Умаровой, с.н.с. З.Н. Тюгай, доценту А.П. Шварову, к.б.н. Е.В. Фаустовой и др. Отдельная благодарность ФГБНУ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева» и его сотрудникам, в частности, К.Н. Абросимову, Е.Б. Скворцовой, а также А.Д. Поздняковой за помощь в проведении экспериментов.

## **Глава 1. Обзор литературы**

В главе дан обзор научной литературы. Подробно рассмотрена основная гидрофизическая характеристика (ОГХ), в том числе влияние на нее основных свойств минеральных почв. Уделено внимание свойствам торфяных почв, оказывающим влияние на положение кривой ОГХ. Рассмотрены основные понятия, связанные с теплофизическими свойствами торфоземов. Особое внимание уделено гистерезису основной гидро- и теплофизической характеристики, их взаимосвязи и возможным гидротермическим явлениям при увлажнении и иссушении

## **Глава 2. Объекты и методы исследования**

**2.1. Объектами исследования** был выбран низинный торф долины р. Яхромы в пределах территории Дмитровского филиала Всероссийского НИИ мелиорированных земель – ДФ ВНИИМЗ.



Точка 1 - торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа.

Точка 2 - торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи.

Точка 3 - торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа.

Точка 4 - торфоземы агроминеральные.

Точка 5 - торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами.

Рисунок 1 – Схема расположения стационаров "Ближний" и "Дальний" (по Позднякову и др., 2014).

## 2.2. Методы исследования.

1. Плотность почвы экспериментально определялась в полевых условиях и рассчитывалась как соотношение массы абсолютно сухой почвы к объему цилиндра, занятого почвой;

2. Влажность определяли термостатно-весовым методом.

3. Зольность типовым методом. Просеянную через сито с диаметром отверстий 1 мм навеску почвы помещают в предварительно доведенный до постоянной массы фарфоровый тигель. Одновременно берут навеску на определение влажности. Тигель помещают в холодную муфельную печь. После сгорания, золу доводят до однородной окраски, прокаливая не менее 2-х часов. Прокаливание необходимо повторять до доведения тигля с навеской до постоянной массы (Вихляев, 1960).

4. Степень разложения согласно ГОСТ 10650-2013. 1.

5. Для получения кривой ОГХ в области  $rF$  от 1 до 2,9 использовали метод капилляриметров в зондовом варианте («Теории и методы физики почв», 2007). Различную плотность в экспериментальных стаканчиках создавали искусственным уплотнением.

6. В лабораторных условиях температуропроводность определялась методом Кондратьева («Теории и методы физики почв», 2007).

7. Томографическое исследование образцов торфоземов выполнено в Почвенном институте им. В.В. Докучаева на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172G. с привлечением оборудования Центра коллективного пользования «Функции и свойства почв и почвенного покрова» ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева». Томографические срезы обработаны и проанализированы при помощи следующего программного обеспечения (Bruker SkyScan NRecon User Manual, 2016): Data Viewer, CTvox, CTan. (SkyScan

CTvox Quick Start Guide, 2014; SkyScan Morphometric parameters measured by Skyscan CTanalyser software. User Guide, 2017).

### **Глава 3. Результаты и обсуждение**

#### **3.1 Основные свойства торфоземов Яхромской долины**

##### **3.1.1 Зольность, степень разложения и угол смачивания**

В ходе работы были исследованы основные свойства, характерные для торфоземов Яхромской долины, такие как плотность, зольность и степень разложения.

Два исследуемых стационара сейчас вовлечены в сельское хозяйство и используются в севооборотах, причем стационар «Дальний» более 55 лет, а стационар «Ближний» более 105 лет. Зольность торфоземов двух характерных почвенных разрезов на первом стационаре близка по значениям на двух изучаемых глубинах. Также с глубиной мы можем наблюдать незначительное уменьшение зольности на 3-4%, что можно объяснить минерализацией органического вещества. В верхних слоях почвы наблюдается накопление железа, что также оказывает непосредственное влияние на величины зольности.

Что касается степени разложения, закономерность сохраняется аналогичная зольности: наибольшая степень разложения у древесных торфоземов, а наименьшая у торфоземов гипновых - находящихся под лесной растительностью в настоящее время.

Исследование степени разложения и зольности данных торфоземов проводилось еще в 1963-1966. Ц.И. Минкина в 1972 выпустила статью, с итоговыми и обобщающими данными по проведенным исследованиям (Минкина, 1972). Было проведено сравнение наших данных с результатами, полученными в 1963-1966гг. для оценки изменений свойств при длительном сельскохозяйственном использовании (рисунок 2).

Следует отметить, что значения зольности торфоземов возрастают с течением времени в среднем в 1,2-1,5 раза (рисунок 2 а). Однако, для гипновых торфоземов наблюдается обратная картина. Зольность гипновых уменьшилась. Схожие результаты мы можем видеть в отчете торфоболотной станции в 2018 году (Отчет о научной работе ФГБНУ ВНИИМЗ, 2018). Такое изменение можно объяснить тем, что данный участок уже давно не используется в сельском хозяйстве, дренаж на нем разрушен. Во время отбора образцов данная территория была занята лесной растительностью.

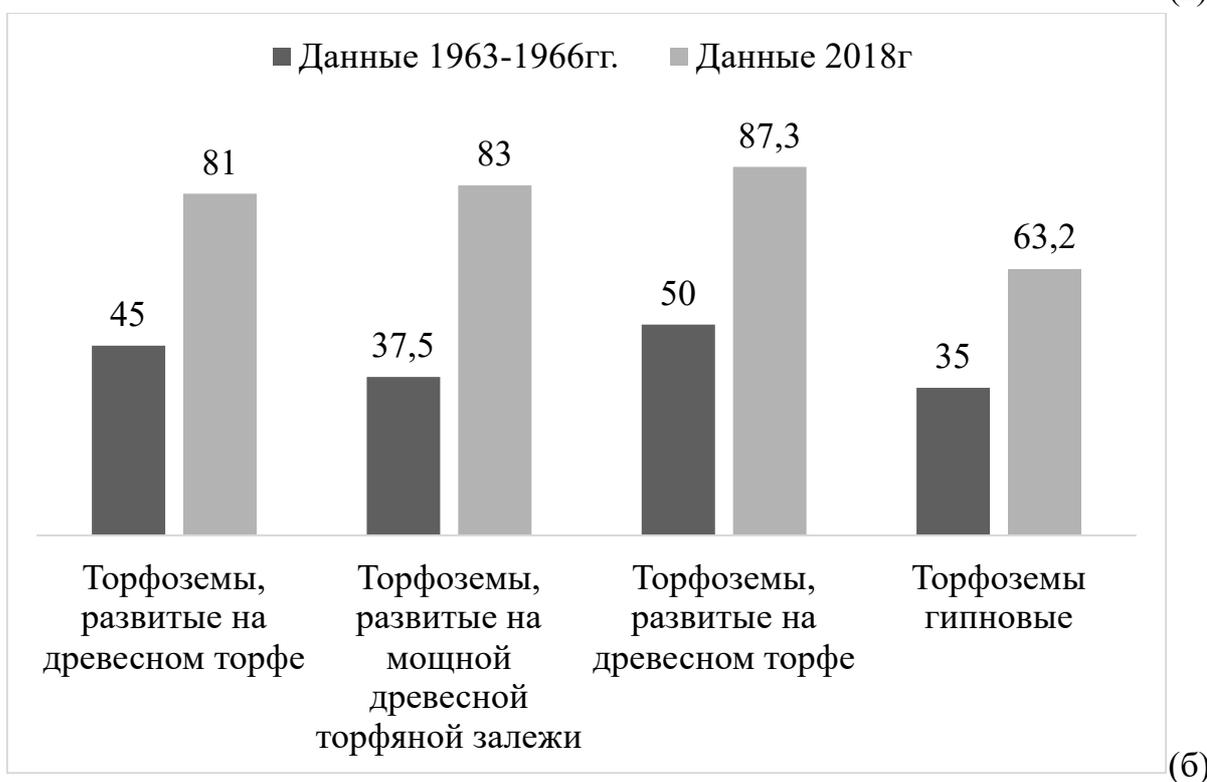
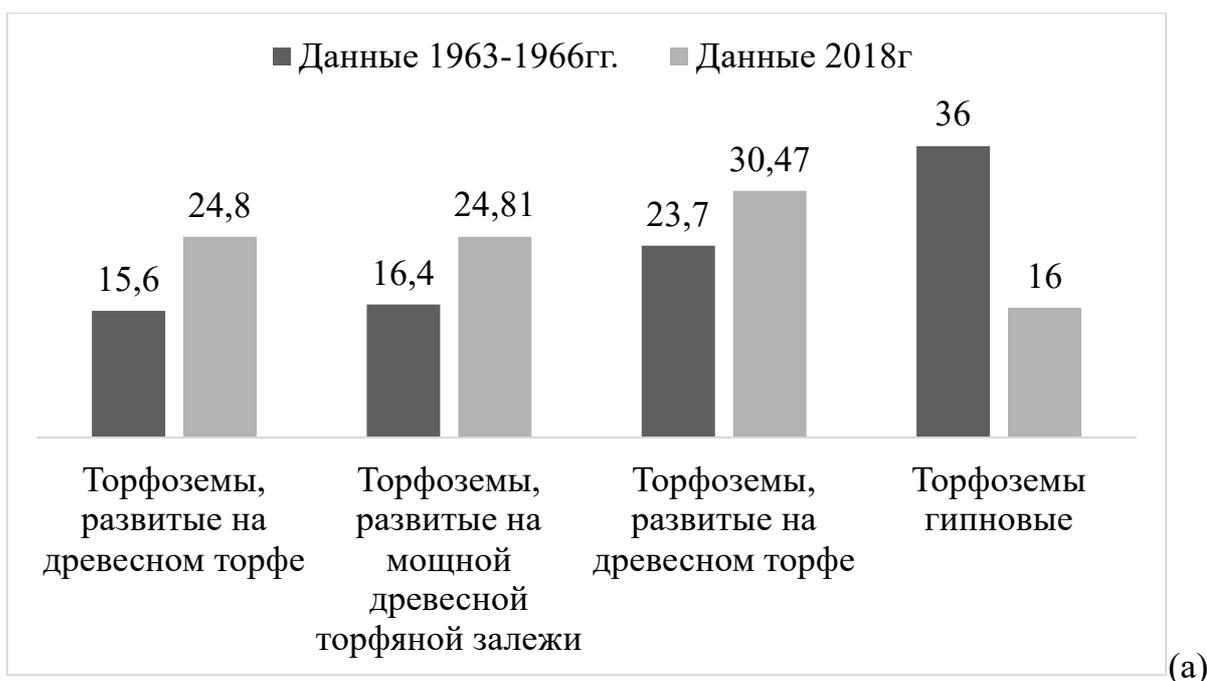


Рисунок 2 – Сравнение данных по зольности (а) и степени разложения (б) 1963-1966гг. (по Минкиной, 1972) с экспериментальными данными 2018г.

При сравнении данных по степени разложения (рисунок 2 б), мы видим ее увеличение в 1,7-2,2 раза. Самое большое изменение, как и в случае с зольностью, характерно для торфов на мощной древесной торфяной залежи, которые имеют наибольшие значения степени разложения среди всех исследуемых почв. Тенденция к увеличению степени разложения при использовании торфоземов - закономерна. Во-первых, данные торфоземы относятся к осушенным, что

приводит к ускорению темпов разложения. Во-вторых, данные торфоземы активно используются в сельском хозяйстве.

В целом, полученные результаты говорят, о существенном изменении свойств торфоземов при сельскохозяйственном использовании.

### 3.1.2 Кривая водоудерживания торфоземов Яхромской долины

Одним из проведенных экспериментов было определение основной гидрофизической характеристики (или кривой водоудерживания) торфоземов и ее зависимости от их основных свойств. Результаты кривой ОГХ представлены в виде графиков в координатах « $pF$ -объемная влажность» (Полужтков, Терлеев, 2005; Шеин, 2010; Rattan Lal, 2005).

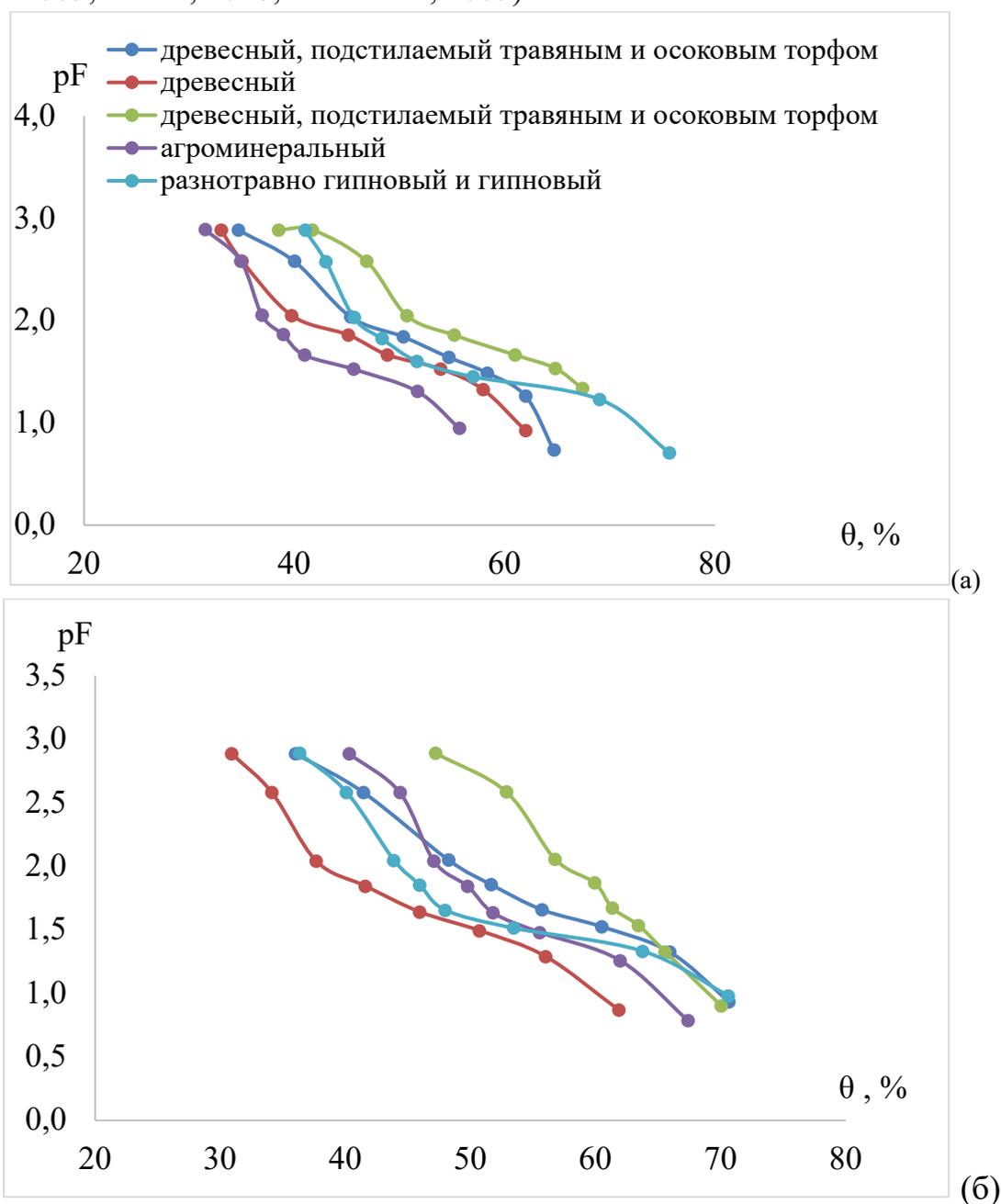


Рисунок 3 – Основная гидрофизическая характеристика торфов различного ботанического состава для глубин 5-15 см (а) и 25-40 см (б).

На рисунке 3 представлены ОГХ для разных слоев и торфоземов разного генезиса. Графики представляют собой классическую s-образную форму кривой. Более низким значениям  $pF$  соответствуют большие значения влажности. Наибольшим водоудерживанием обладают торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе (рисунок 3). Все кривые имеют схожий вид.

Одна из характерных точек перегиба кривой ОГХ для минеральных почв — давление барботирования. Это давление обусловлено наиболее ярко выраженными капиллярными силами, для которых явление «входа воздуха» в заполненный водой капилляр закономерно и имеет некоторое характерное давление ( $pF$ ). Получившиеся кривые для торфоземов гораздо более плавные, точка перегиба не выражена, что можно объяснить незначительным количеством жесткостенных капилляров. Стоит отметить, что давлению ( $pF$ ) равному 2,89 (или 777 см водного столба) соответствует наименьшая объемная влажность 31,5% для торфоземов агроминеральных. Графики были получены для двух глубин 5-15 см и 25-40 см. В целом общий вид кривых для двух глубин носит близкий характер. Для глубины 25-40 см кривые расположены правее, т.е. одному и тому же давлению соответствует более значительная влажность. Максимальное значение объемной влажности, которое было получено в лабораторных экспериментах, составило 71%.

Водоудерживающая способность торфоземов низкая, т.е. для давлений влаги ниже 50-100 см водного столба ( $pF$  1.7-2) величина объемной влажности невелика по сравнению с минеральными почвами. С другой стороны, полученные графики кривых ОГХ это показывают: диапазон влажности для одних и тех же кривых достаточно большой, особенно в области невысоких значений  $pF$ . Это можно объяснить хорошо развитым поровым пространством торфа. Оно представляет собой крупные и неустойчивые образования, состоит из пор, которые проводят влагу и плохо ее удерживают. Вода в порах находится между двумя набухшими ассоциатами, в связи с этим капиллярные силы, которые удерживают воду в торфах практически отсутствуют. Таким образом, для торфяных почв характерна высокая водоотдача (Шейн и др., 2018). Заметное увеличение влажности начинается с  $pF$  близкого к 2. В этой точке происходит перегиб прямой, она становится более плавной.

### ***3.1.2 Основная теплофизическая характеристика торфоземов***

Тепловой режим является одним из лимитирующих факторов для почв, вовлеченных в севооборот. В ходе данной работы были получены основные теплофизические характеристики (Архангельская, 2004) (зависимость температуропроводности ( $k$ ,  $см^2/ч$ ) от объемной влажности (%)) для всех изучаемых торфоземов. На рисунке 4 представлены кривые для глубины 5-15 см.

При сравнении значений температуропроводности с минеральными почвами мы наблюдаем ее уменьшение. Так для торфоземов результаты

эксперимента лежат в диапазоне в диапазоне 2,1-4,5 см<sup>2</sup>/ч. В то время как для, минеральных почв значения могут доходить до 20-30 см<sup>2</sup>/ч (Шеин, 2005). Общий вид кривых носит куполообразный характер. В среднем, мы наблюдаем увеличение теплопроводности до значений влажности 65-75% для торфоземов древесных и древесных подстилаемых травяным осоковым торфом.

Наибольшие отличия имеют торфоземы агроминеральные и гипновые. У первых кривая лежит выше остальных, и мы наблюдаем падение теплопроводности уже при влажности 40%. В то время как в гипновых, наоборот, увеличение значений  $k$ , происходит практически до величины влажности 90% и только при высоких влажностях происходит незначительное падение.

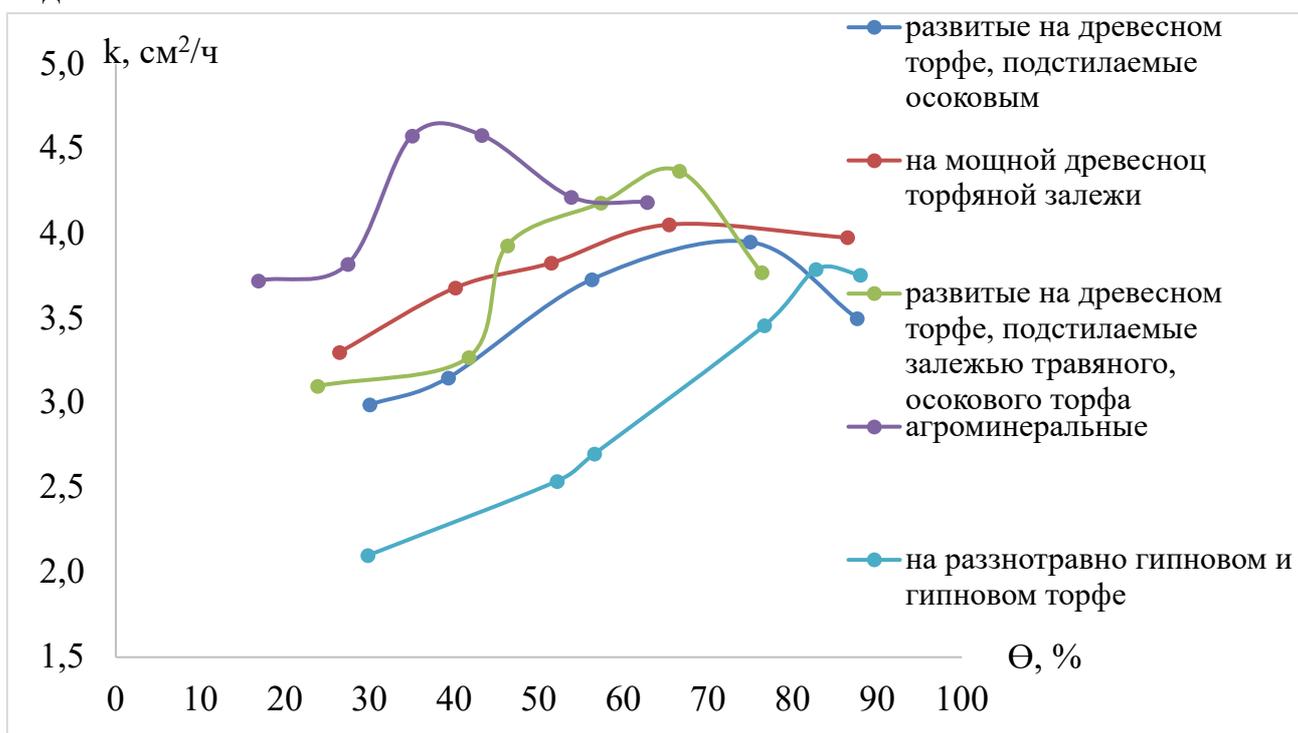


Рисунок 4 – Основная теплофизическая характеристика торфоземов для глубины 5-15см.

Общее расположение кривых для торфов схожих по свойствам носит взаимно аналогичный характер. Но наблюдается незначительное изменение расположения кривых для торфов, отличающихся по своим свойствам. Это говорит о том, что при вовлечении их в севооборот или при другом использовании (например, почвенные конструкции) в каждом конкретном целевом применении необходимо учитывать их свойства.

### ***3.2 Зависимость основной гидрофизической характеристики от основных свойств торфоземов***

В рамках проделанной работы были экспериментально получены кривые ОГХ в области рF 1-3 торфоземов различного ботанического состава для насыпных и насыпных уплотненных образцов. Как и в случае с минеральными

почвами плотность влияет на положение кривой водоудерживания.

Было проведено сравнение кривых для уплотненных и рыхлых образцов. Данные плотности представлены в таблице 1. На рисунке 5 представлены кривые ОГХ в координатах « $pF$ - массовая влажность, %» для глубины 5-15 см, для торфоземов на мощной древесной торфяной залежи. Влияние уплотнения схоже с минеральными почвами. В области низких значений  $pF$  кривая смещается влево. Такое изменение кривой вероятно связано с изменением толщины капилляров (утоняются), вызывая при этом уменьшение значений влажности, за счет уменьшения количества крупных капилляров, которые удерживают влагу.

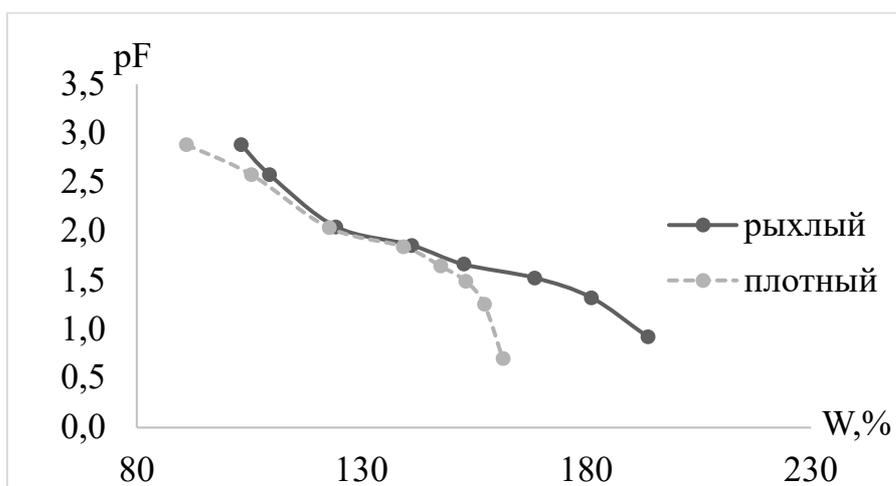


Рисунок 5 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема на мощной древесной торфяной залежи, глубины 5-15 см.

Таблица 1 – значения плотности для насыпных образцов при определении основной гидрофизической характеристики.

Название торфозема	Плотность насыпного рыхлого образца, г/см <sup>3</sup> , глубина 5-15см	
торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи	0,32	0,49
торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа	0,43	0,5
торфоземы агроминеральные	0,75	0,9
торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами	0,17	0,23

Торфоземы древесные подстилаемые травяным и осоковым торфом имели самую высокую степень разложения и зольность среди всех изучаемых почв. Для глубины 5-15 см (рисунок 6) изменение положения кривой ОГХ имеет в целом аналогичный характер по сравнению с древесными торфоземами.

Влияние уплотнения на положение кривой ОГХ других образцов носит аналогичный характер. На рисунках 7, 8 представлены кривые для торфозема агроминерального и гипсового глубины 5-15 см.

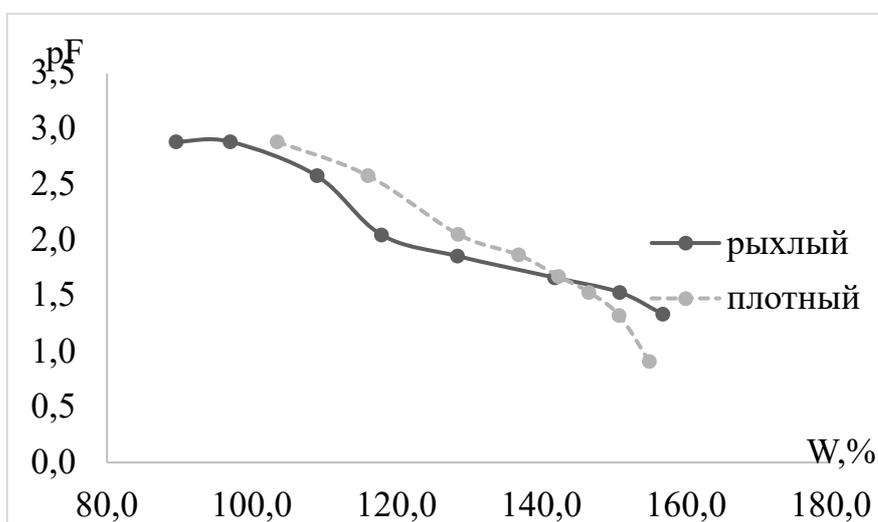


Рисунок 6 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема древесного, подстилаемого травяным, осоковым торфом, глубины 5-15 см.

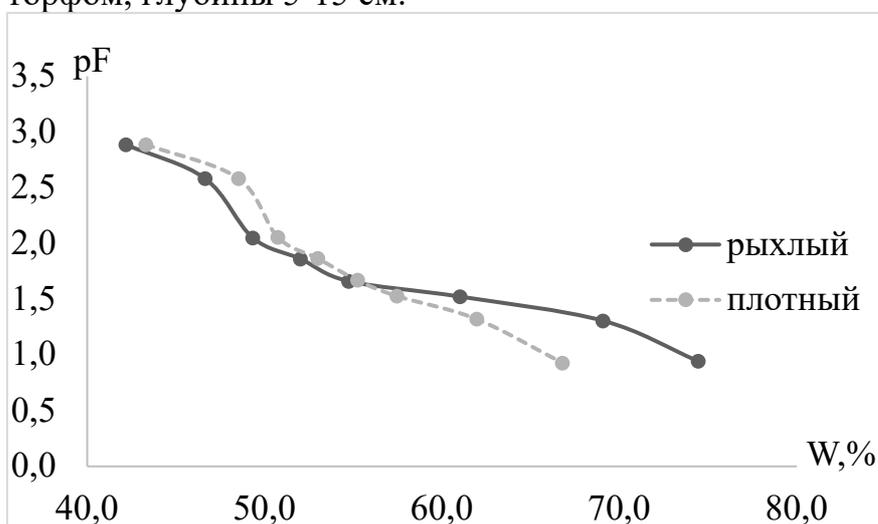


Рисунок 7 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема агроминерального, глубины 5-15 см.

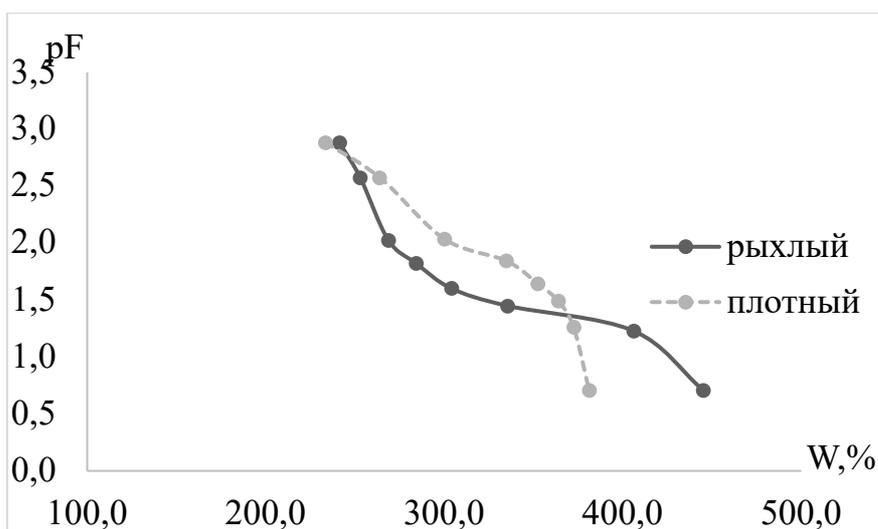


Рисунок 8 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема гипнового, глубины 5-15 см.

Вероятно, вторым фактором, влияющим на положение кривой ОГХ является содержание макроэлементов, или в отношении торфяных почв, - зольность. К зольным элементам как правило относятся P, K, Ca, Mg и др. В составе золы данных торфов наблюдается повышенное содержание ионов Ca и Fe (Поздняков и др., 2014), в то время, как и в большинстве торфов содержание ионов K в них незначительное. Для данных ионов характерен такой процесс как гидратация – образование гидратной оболочки. В процессе попадания воды в почву должно происходить связывание воды за счет образования гидратированных ионов в растворе. К тому же, может происходить образование кристаллогидратов, которые также содержат молекулы воды. В почве содержатся различные соединения металлов, которые в свою очередь могут взаимодействовать с водой (Шеин и др., 2018). В этом случае будет проходить разрушение (возможно, частичное) кристаллической решетки и последующая сольватация (гидратация) ионов. Таким образом, часть воды связывается химически, что повышает водоудерживающую способность.

Следующим важным свойством торфоземов является степень разложения. Под ней мы будем понимать содержание бесструктурной массы, имеющей в составе гуминовые вещества и остатки растений.

На рисунке 9 представлены 3-х мерные графики, полученные в программе Statistica, зависимости влажности от трех основных свойств торфоземов: степени разложения, плотности и зольности.

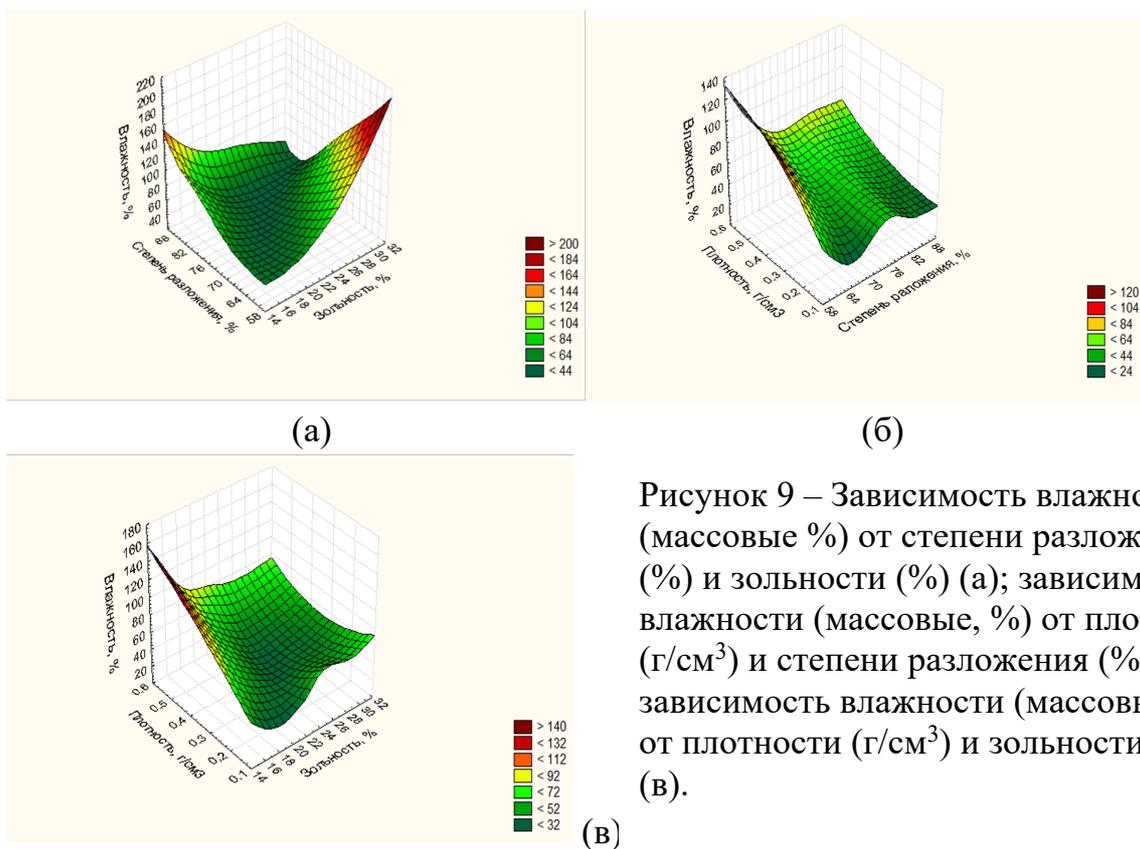


Рисунок 9 – Зависимость влажности (массовые %) от степени разложения (%) и зольности (%) (а); зависимость влажности (массовые, %) от плотности (г/см<sup>3</sup>) и степени разложения (%) (б); зависимость влажности (массовые %) от плотности (г/см<sup>3</sup>) и зольности (%) (в).

Проанализировав все полученные графики, можно сделать вывод о влиянии таких свойств как: плотность, зольность и степень разложения на положение кривой водоудерживания. Наибольшее влияние оказывает плотность. Даже малозаметные ее изменения, на 0,15 г/см<sup>3</sup> ведут к резкому смещению графиков в сторону больших влажностей. В то время как увеличение зольности и степени разложения показывает аналогичную зависимость, однако их влияние выражено гораздо слабее. Вероятно, именно эти свойства торфоземов будут являться свойствами-предикторами при получении педотрансферных функций для органогенных почв.

### 3.2.1 Гистерезис основной гидрофизической характеристики торфоземов

При изучении основной гидрофизической характеристики почв в данной работе большое внимание уделяется ее гистерезису, обусловленному различиями в процессах ее получения - иссушения или увлажнения. При моделировании этих процессов для минеральных почв имеется достаточное количество данных, на основе которых можно предсказывать поведение влаги. Существуют модели и расчетные процедуры, которые позволяют учитывать гистерезисные явления (Van Genuchten, 1980; Kool and Parker, 1987; Šimůnek et al., 2008; Терлеев и др., 2014, 2016; Likos et al., 2014; Lamorski et al., 2017; Shein, Mady, 2018; Mady, Shein, 2021). В то время как для органогенных почв таких данных нет. При использовании в сельском хозяйстве влажностный гистерезис необходимо знать для орошения, расчёта норм полива. В данной работе были получены кривые

ОГХ в режимах иссушения и увлажнения. Кроме того, не совсем ясно, в зависимости от каких свойств и в какой степени гистерезисные явления свойственны торфоземам.

Кривые были получены для торфоземов древесных, подстилаемых травяным и осоковым торфом, торфоземов агроминеральных и торфоземов на разнотравно-гипновом и гипновом торфе (рисунок 7). Для каждого вида было взято по 2 глубины: 0-20см и 20-40см. Для всех полученных кривых было выявлено явление гистерезиса.

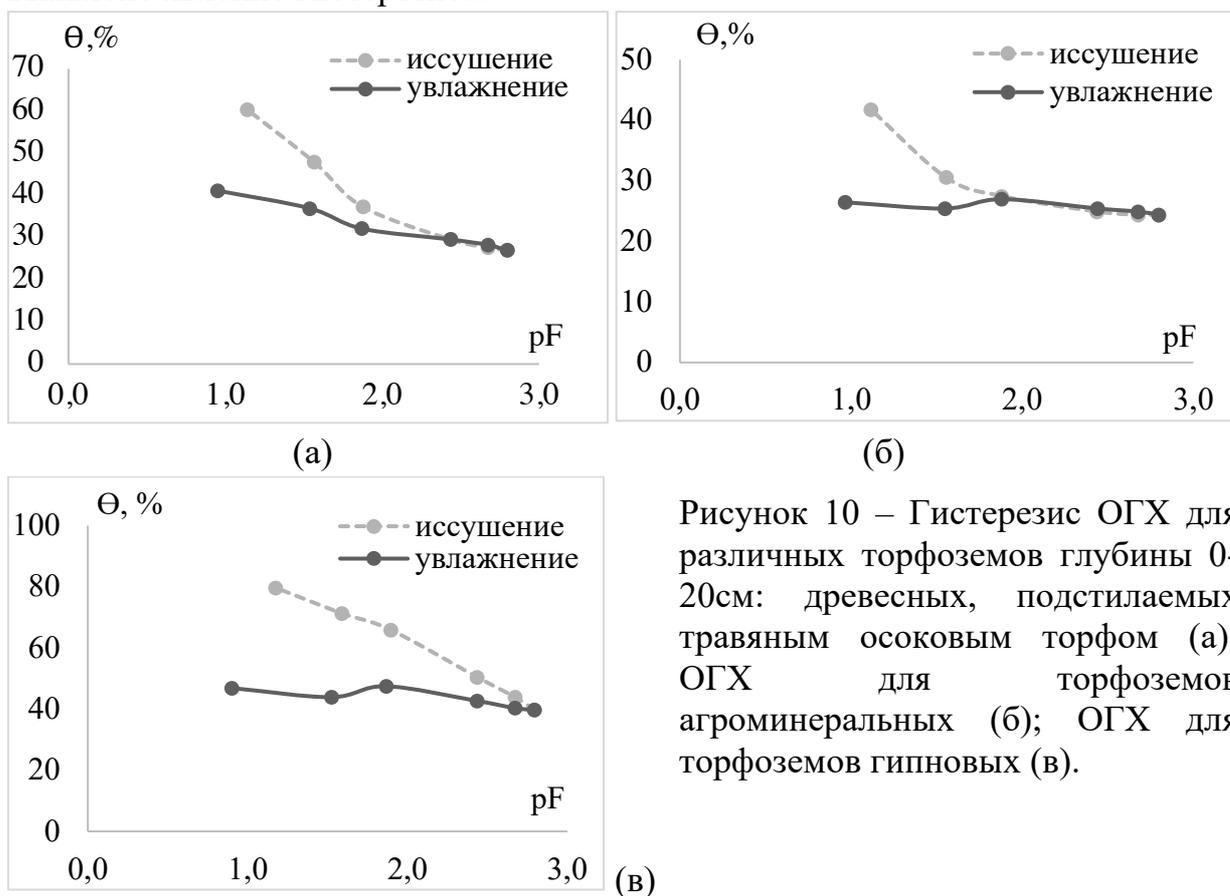


Рисунок 10 – Гистерезис ОГХ для различных торфоземов глубины 0-20см: древесных, подстилаемых травяным осоковым торфом (а); ОГХ для торфоземов агроминеральных (б); ОГХ для торфоземов гипновых (в).

На рисунке 10 (а) представлены полученные кривые для древесных торфоземов в координатах «Объемная влажность-рF». Кривые имеют s-образный характер, что в целом повторяет форму зависимостей для минеральных почв. Однако, как и кривые, полученные в других наших экспериментах, кривые для торфоземов имеют более плавную форму. Точка перегиба в области рF 1,5 выражена слабо. При низких значениях влажности кривые иссушения и увлажнения практически «склеены» друг с другом, т.е. имеют близкие значения влажности при одинаковом значении рF. Далее с уменьшением значений давления влаги (по абсолютной величине), кривые начинают «расходиться», достигая максимального значения при наименьшем значении рF. Такой внешний вид кривых доказывает наличие явлений гистерезиса. Стоит обратить внимание, что форма кривых для иссушения и увлажнения отличаются: в режиме

увлажнения кривые имеют более плавную форму, точки перегиба практически отсутствуют. Следует также отметить, что кривые иссушения и увлажнения имеют максимальные различия во влажности при давлениях влаги, близких к единице. Вероятно, в органогенных почвах это явление связано прежде всего с переформированием структуры порового пространства в процессах иссушения и увлажнения, т.е. различием кривых усадки (ветвь иссушения) и набухания (ветвь увлажнения). Эти различия в поровом пространстве при усадке и набухании и приводят к заметным различиям кривых ОГХ при увлажнении и иссушении.

Аналогичные кривые были получены также и для агроминеральных торфоземов (рисунок 10 б). В зависимости от того в каком режиме были получены кривые они также отличаются: в режиме иссушения значения объемной влажности больше при одинаковом значении  $rF$  нежели чем в режиме увлажнения. Для агроминеральных торфоземов было достигнуто наименьшее из всех значение влажности в режиме иссушения (первая точка, с которой начинался эксперимент) - 41% для глубины 0-20 см, что еще раз подчеркивает возможность гипотетической перестройки порового пространства почв.

Также были получены кривые гистерезиса ОГХ для гипновых торфоземов (рисунок 10 в). Общий внешний вид их не отличается от стальных кривых. При этом гипновые почвы удалось насытить до значений объемной влажности 79 и 82% для глубин 0-20 и 20-40 см соответственно. Общая форма кривой более пологая, точка перегиба практически отсутствует в режиме иссушения. При этом в режиме увлажнения можно увидеть незначительный перегиб при  $rF$  равном 1,8. «Петля» гистерезиса, т.е. ширина между двумя кривыми достигает значения 35%, которое является максимальным по сравнению с древесными и агроминеральными торфоземами. При этом у гипнового торфа в ходе эксперимента была наименьшая плотность - 0,2 и 0,15 г/см<sup>3</sup> для глубин 0-20 и 20-40 см соответственно. Аналогичная связь между этими явлениями была показана в статье Rafrat S. с соавторами (2016).

Явление гистерезиса основной гидрофизической характеристики имеет большое как научное, так и практическое значение. При использовании торфоземов в сельском хозяйстве необходимо рассчитывать нормы полива, изменяющиеся при учете гистерезиса. Именно для практических целей, - расчетов норм, сроков поливов и используют гистерезисные явления, позволяющие в ряде случаев экономить поливную воду. Для точных расчетов необходимо знать гидрофизические свойства почв, в том числе и гистерезис.

Количественное описание гистерезисной реакции почвы во время циклов высыхания-увлажнения необходимо для создания и улучшения прогнозных моделей удержания влаги в почве. Результаты экспериментов показывают, что на явление гистерезиса влияет плотность, размер частиц. Полученные результаты могут быть очень полезны при моделировании потоков воды в почве, при

расчетной оптимизации режимов в торфоземах.

### **3.3 Экспериментальная оценка наличия гистерезиса основной теплофизической характеристики торфоземов**

Для торфяных почв существует мало информации для регулирования и прогноза изменения гидротермического режима, в основе которых лежит зависимость температуропроводности почв от влажности (Архангельская, 2012). Именно эта зависимость лежит в основе расчета температурного режима почв, позволяет совместно и сопряженно рассматривать водный и тепловой режимы. Действительно, если для расчетов и прогнозов водного режима используется ОГХ, то для последующих, связанных с влажностью расчетов теплового и температурного режима, необходима зависимость теплофизических свойств от влажности. Эта зависимость – нелинейная зависимость температуропроводности от влажности, которая вполне обоснованно может быть названа основной теплофизической характеристикой. Торф отличается своими специфическими физическими свойствами: низкая плотность, гидрофобность в сухом состоянии, резким набуханием, поэтому лабораторные исследования его являются затруднительными (Johnson et al., 2003; Поздняков, 2008; Рабинович и др., 2016;). В данной главе представлено влияние процессов иссушения и увлажнения на зависимость коэффициента температуропроводности от влажности с оценкой возможности явления гистерезиса этой зависимости в этих почвах.

Мы исходили из гипотезы, что значения влажности почвы для процессов иссушения и увлажнения различаются за счет гистерезиса. В то же время, хорошо известно, что объемная теплоемкость  $C_v$ , существенно зависит от влажности

$$C_v = 0.48f_m + 0.6f_{org} + f_w \quad (1),$$
 где  $f_m$ ,  $f_{org}$ ,  $f_w$  – объемные доли минеральной, органической частей и воды.

Данное уравнение учитывает как влажность почвы, так и содержание органического вещества. Заметим, что  $f_w$  (влажность в долях от единицы) при иссушении будет больше, чем при увлажнении за счет различия влажности (при увлажнении меньше, чем при увлажнении). В свою очередь, температуропроводность аналитически связана с величиной объемной теплоемкости воды, определяемой её влажностью:

$$k = \frac{\lambda_T}{c_m \rho_b} \quad \text{или} \quad k = \frac{\lambda_T}{C_v} \quad (2),$$
 где  $C_m$  – удельная теплоемкость,  $\rho_b$  – плотность почвы,  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности,  $C_v$  – объемная теплоемкость. Однако следует учитывать, что при иссушении влажность торфозема будет выше, чем при увлажнении за счет гистерезиса. Следовательно, при иссушении следует ожидать и более низкой величины  $C_v$ , а следовательно, более высокой температуропроводности. Следовательно, с учетом явлений гистерезиса, в увлажняющейся почве тепловой поток будет выражен лучше, быстрее, чем в иссушающейся. На основании этого можно ожидать, что

температуропроводность при увлажнении и иссушении должна отличаться: при увлажнении будет выше, чем при иссушении. В работе были проведены экспериментальные исследования температуропроводности торфоземов в двух режимах – увлажнения и иссушения.

Для сравнения кривых нами была проведена аппроксимация двух кривых одним уравнением. Так как общий вид зависимости температуропроводности от влажности носит куполообразный характер было выбрано уравнение параболы  $k(\theta) = a * \theta^2 + b * \theta + c$ . Важно отметить, что полученные параметры при уровне значимости 0,05 оказываются значимы только для образцов гипнового торфа с глубины 0-20см, а также для торфозема древесного подстилаемого травяным и осоковым торфом – глубина 20-40 см. для других полученных данных уровень значимости варьирует от 0,1 до 0,2. Вероятно, в дальнейших исследованиях необходимо увеличивать количество повторностей и уточнять методику определения температуропроводности лабораторными методами.

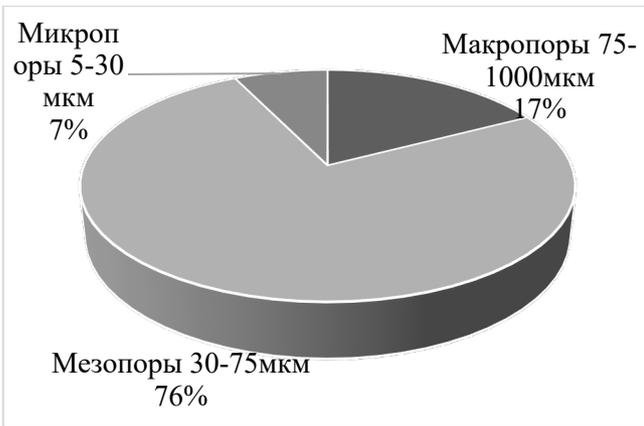
Зная параметры аппроксимации, особенности их статистических распределений, можно статистически сравнить зависимости температуропроводности от влажности для процессов иссушения и увлажнения, сделать вывод об их отличии. Мы делали это с помощью *t*-критерия. В нашем случае, расчеты показали, что кривые достоверно не отличаются. Это говорит о том, что гистерезис для температуропроводности торфяных почв при практических расчетах температурного режима торфоземов не оказывает статистически значимого влияния, и можно не учитывать гистерезисные явления, связанные с основной теплофизической характеристикой в исследованном диапазоне влажности. В дальнейшем, на основании проведенных экспериментов и статистических расчетов можно утверждать, что гистерезис основной теплофизической характеристики отсутствует и при расчетах мы можем его не учитывать. Безусловно, данный вывод необходимо проверить на большем количестве объектов и при значительно большем количестве определений, так как вполне понятно уровень значимости того или иного явления зависит от количества повторностей, от объема выборки.

Торфяные почвы по своим физическим свойствам сильно отличаются от минеральных. В то же время они активно используются на данный момент в сельском хозяйстве, поэтому изучение их свойств особенно актуально. Температурный режим довольно часто является лимитирующим фактором, а в связи с нехваткой данных его сложно регулировать. В связи с сильным набуханием и гидрофобностью торфа при иссушении, важно знать, что зависимость температуропроводности от объемной влажности торфа однозначна, не обладает гистерезисом и может быть использована для прогноза теплового режима почв как при их увлажнении, так и при иссушении.

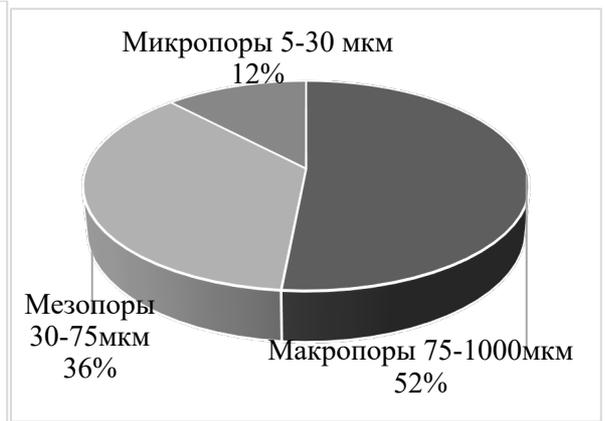
### ***3.4 Томографическая съемка ненарушенных образцов торфоземов***

Поровое пространство торфоземов отличается от минеральных почв. В предыдущих исследованиях отмечалось, что, по-видимому, в процессах увлажнения и иссушения происходит перестройка порового пространства, чем и обуславливается в основном влажностный гистерезис в торфяных почвах. Явления набухания и усадки в них выражены особенно ярко, а именно они являются основными при изучении явлений гистерезиса. Нами было исследовано поровое пространство торфоземов с помощью микротомографической съемки. Исследование проводилось для двух значений влажности: полевая и насыщенная почва.

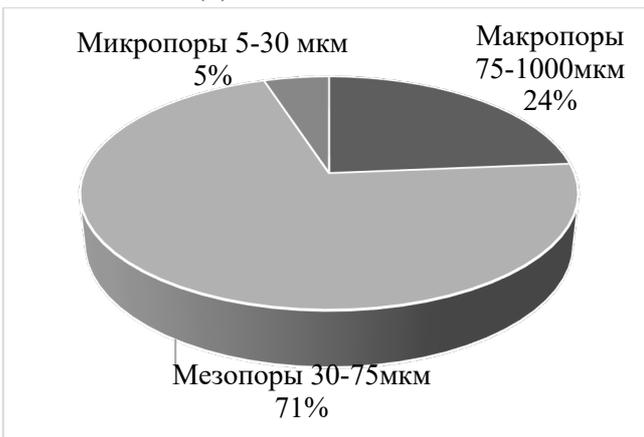
На рисунке 11 (а, б) представлена диаграмма торфозема древесного, подстилаемого травяным осоковым торфом, расположенным на стационаре Дальний, вовлеченном в сельскохозяйственное использование в 1961-1965 гг. На графике видно, что при увлажнении происходит увеличение количества макропор, при этом количество мезопор сокращается. При подсчете суммарного объема мезо и макропор мы получаем, что объем, занимаемый крупными порами, возрастает в 3 раза с 17 до 52%, а мезопоры сокращаются в 2 раза с 76 до 36%. При этом количество микропор также увеличивается с 7 до 12%. Объясняя различия в поровом пространстве для сухого и увлажненного образца, мы исходим из следующей гипотезы: анализ распределения пор для различных почвенных объектов позволяет сделать вывод о том, что набухание происходит за счёт капиллярных сил в микро- и мезо-порах. При этом объем более крупных пор возрастает за счет давления влаги в тонких поровых структурах, которое развивается при водопоглощении тонкими порами (мезо- и микро-размера). Для торфоземов на мощной древесной торфяной залежи график распределения пор по размерам носит схожий характер (рисунок 11 в, г). Общий объем макропор увеличивается с 23 до 51%, а мезопоры сокращаются с 71 до 41%. Что касается торфоземов древесных расположенных на стационаре Ближнем (рисунок 8 д, е), то здесь графики для естественной влажности и насыщенного образца практически совпадают. Наблюдается незначительное сокращение макропр с 68 до 71%. Для агроминеральных торфоземов (рисунок 8 ж, з) тенденция в целом сохраняется: часть мелких пор переходят в более крупные, которые начинают занимать объем более значительный, чем в сухом торфе. Общий объем макропор увеличивается с 64 до 74%, в то время как мезопоры сокращаются с 28 до 23%. На рисунке 8 (и, к) представлена диаграмма распределения пор по размерам для торфоземов на гипновом и разнотравно-гипновом торфе. Общая закономерность сохраняется, при подсчете общего объёма, занимаемого порами, мы видим, что количество макропор возрастает с 66 до 87%, в то время как мезопоры сокращаются с 31 до 12%.



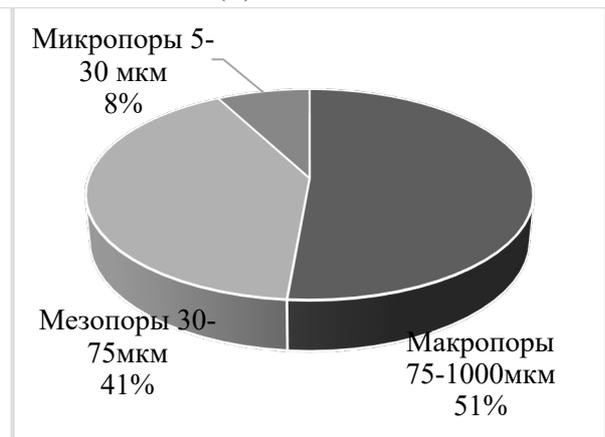
(а)



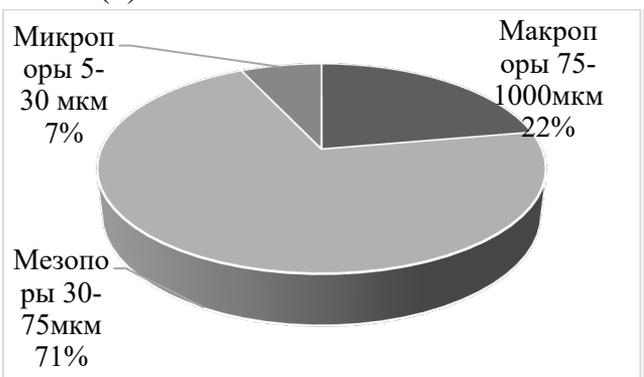
(б)



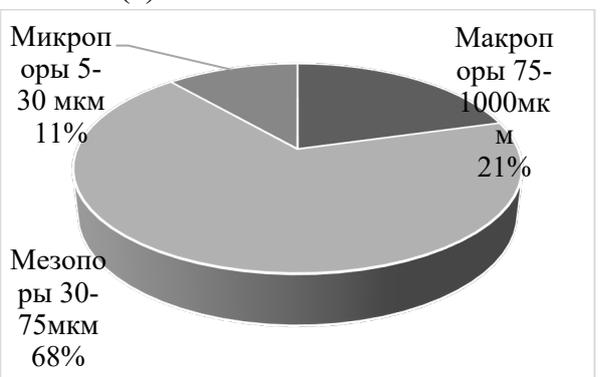
(в)



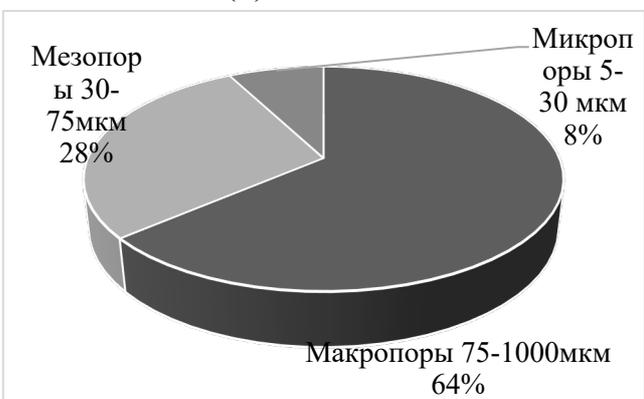
(г)



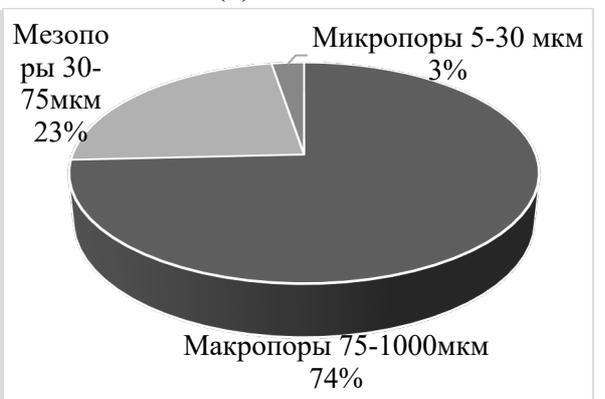
(д)



(е)



(ж)



(з)

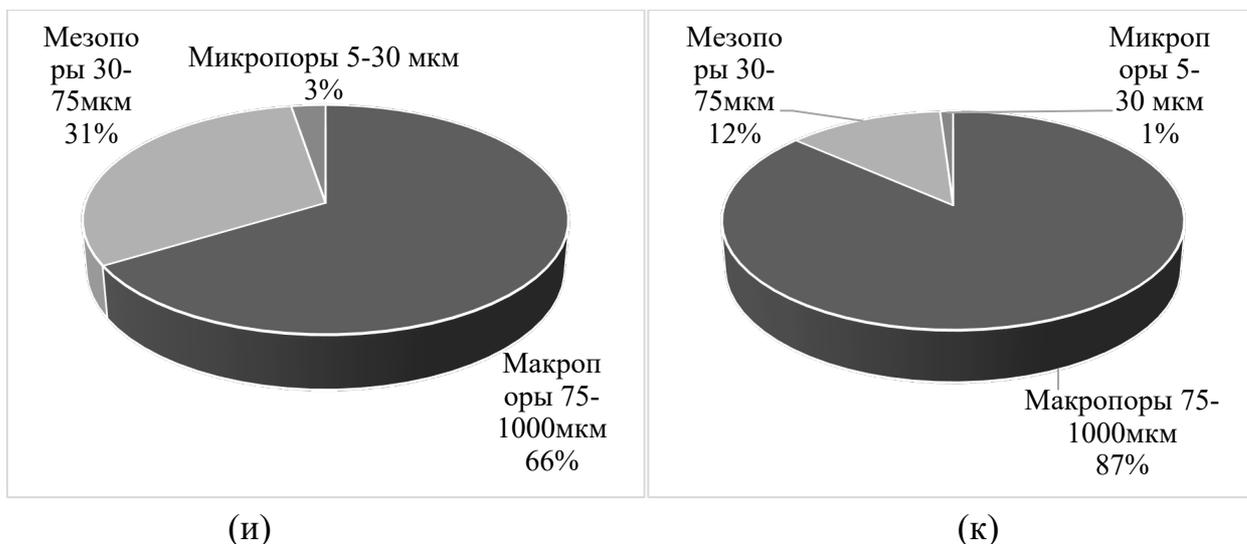


Рисунок 11 – Распределение пор по размерам для торфозема древесного, подстилаемого травяным и осоковым торфом. Стационар Дальний. (а – влажность близкая к полевой; б – насыщенный образец); для торфоземов на мощной древесной торфяной залежи (в – влажность близкая к полевой; г – насыщенный образец); для торфозема древесного, подстилаемого травяным и осоковым торфом. Стационар Ближний. (д – влажность близкая к полевой; е – насыщенный образец); для торфоземов агроминеральных. (ж – влажность близкая к полевой; з – насыщенный образец); в торфоземе на разнотравно-гипновом и гипновом торфе. (и – влажность близкая к полевой; к – насыщенный образец).

Для всех полученных графиков можно сделать вывод: в этих торфах кривые распределения пор схожи. Общим для большинства торфоземов является превращение части тонких пор при естественной влажности в более крупные при увлажнении – торф набухает. Это указывает на то, что за явление гистерезиса отвечают характерные для торфоземов процессы набухания и усадки, которые можно наблюдать на кривых распределения пор по размерам.

Анализ диаграмм распределения пор по размерам и кривых гистерезиса ОГХ позволяет сделать вывод, что при увлажнении увеличиваются в разы объемы макропор, за счет снижения мезо- и частично микропор. Наиболее ярко этот процесс выражен в гипновом и в древесном торфоземах (на мощной древесной торфяной залежи и подстилаемых торфяным осоковым торфом). Следовательно, именно в этих торфоземах гистерезис влажности связан с процессами набухания и переходом мезопор в более крупные макропоры. Безусловно, учитывая важность и количественную сторону этого процесса гистерезиса следует определять и учитывать гистерезис ОГХ при использовании математических физически обоснованных моделей прогноза водного режима, опираясь в основном на ботанический состав торфоземов. При ботаническом

составе в виде гипновых мхов, а также для древесных торфоземов, подстилаемых травяным осоковым торфом, влажностный гистерезис имеет существенное значение, необходимо количественно учитывать при создании почвенных моделей.

### *Заключение*

В работе выявлено, что общий вид основной гидрофизической характеристики торфоземов различного ботанического состава, зольности и плотности повторяет S-образную форму кривой минеральных почв с менее выраженной точкой перегиба в области давления барботирования. Среди изученных свойств торфоземов – плотности, зольности и степени разложения, наибольшее влияние на положение кривой ОГХ оказывает плотность. Уплотнение исследованных торфоземов приводит к росту их водоудерживающей способности, обусловленное увеличением количества тонких капилляров.

В контролируемых условиях лабораторных экспериментов был выявлен гистерезис основной гидрофизической характеристики, причем наибольшая «петля» гистерезиса получена для гипновых торфоземов, отличавшихся наименьшей плотностью сложения ( $0,15-0,2 \text{ г/см}^3$ ). Это говорит о необходимости учета плотности при расчетах водного режима.

Для зависимости температуропроводности от объемной влажности (основная теплофизическая характеристика) в циклах иссушения и увлажнения, явлений гистерезиса не выявлено, что доказано статистическими методами. Это указывает на то, что при расчетной оптимизации теплового режима в указанном диапазоне влажности почвы не требуется введения кривых гистерезиса основной теплофизической характеристики.

С помощью томографических методов показано, что при насыщении торфоземов водой происходит изменение структуры порового пространства: в кривых распределения пор по размерам: объемные содержания тонких (от 0,01 до 0,1 мм) пор снижаются за счет перехода их в разряд более крупных пор.

### Список публикаций по теме диссертации

*Публикации в изданиях, входящих в базы RSCI, Web of Science и/или Scopus, рекомендованных к защите в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова:*

1. Шейн Е.В., Позднякова А.Д., Шваров А.П., Ильин Л.И., Сорокина Н.В., Гидрофизические свойства высокозольных низинных торфяных почв //Почвоведение. – 2018. – №. 10. – С. 1259-1264. DOI: 10.1134/S0032180X18100118 IF (РИНЦ): 2,417 [Shein E. V., Pozdnyakova A. D., Shvarov A. P., Il'in L. I., Sorokina N. V., Hydrophysical properties of the high-ash lowmoor peat soils //Eurasian Soil Science. – 2018. – Т. 51. – С. 1214-1219. DOI: 10.1134/S1064229318100113 IF (SJR): 0.431] Вклад автора в печатных листах: (0,44/0,35) (здесь и далее в скобках приведен объем публикации в печатных листах и вклад автора в печатных листах).
2. Шейн Е.В., Позднякова А.Д., Сорокина Н.В., Дембовецкий А.В., Шваров А.П., Ильин Л.И., Теплофизические свойства торфозема на низинном торфе //Почвоведение. – 2019. – №. 11. – С. 1339-1345. DOI: 10.1134/S0032180X1911011X IF (РИНЦ): 2,417 [Shein E. V., Pozdnyakova A. D., Sorokina N. V., Dembovetsky A. V., Shvarov A. P., Il'in L. I., Thermophysical Properties of Histosols on Lowmoor Peat //Eurasian Soil Science. – 2019. – Т. 52. – С. 1363-1368. DOI: 10.1134/S1064229319110115 IF (SJR): 0.431] (0,38/0,19).
3. Калнин Т.Г., Ивонин Д., Абросимов К.Н., Грачев Е.А., Сорокина Н.В., Анализ томографических изображений структуры порового пространства почв методами интегральной геометрии //Почвоведение. – 2021. – Т. 55. – №. 9. – С. 1113-1123. DOI: 10.31857/S0032180X21090033 IF (РИНЦ): 2,417 [Kalnin T. G., Ivonin D. A., Abrosimov K. N., Grachev E. A., Sorokina N. V., Analysis of tomographic images of the soil pore space structure by integral geometry methods //Eurasian Soil Science. – 2021. – Т. 54. – С. 1400-1409. DOI: 10.1134/s1064229321090039 IF (SJR): 0.431] (0,69/0,17).
4. Сорокина Н.В., Шейн Е.В., Абросимов К.Н. Влажностный гистерезис торфоземов: значение структуры порового пространства // Проблемы агрохимии и экологии. – 2023. – №1. – С 23-29. DOI: 10.26178/AE.2023.47.57.004 IF (РИНЦ): 0,489 (0,44/0,35).