

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

На правах рукописи



Сорокина Наталья Владимировна

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

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук,
профессор Е.В. Шеин

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Актуальность..... | 4 |
| Степень разработанности темы исследования..... | 4 |
| Цель и задачи исследования | 5 |
| Цель работы - | 5 |
| Теоретическая и практическая значимость работы..... | 6 |
| Методология исследования | 6 |
| Степень достоверности и апробации работы..... | 7 |
| Структура и объем работы..... | 8 |
| Личный вклад автора..... | 8 |
| Благодарности..... | 8 |
| ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ | 9 |
| 1.1 Торфоземы и их происхождение. Торфоземы Верхневолжской низменности | 9 |
| 1.2 Гидрологические режимы минеральных и органогенных почв полесий.. | 11 |
| 1.3 Основная гидрофизическая характеристика почв | 14 |
| 1.3.1 Основная гидрофизическая характеристика торфяных почв | 22 |
| 1.3.2 Гистерезис основной гидрофизической характеристики почв..... | 25 |
| 1.4 Тепловой режим торфяных почв | 28 |
| ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ | 40 |
| 2.1 Объекты исследования | 40 |
| 2.2. Методы исследования | 48 |
| 2.2.1. Методы исследования основных физических свойств | 48 |
| 2.2.2. Метод определения основной гидрофизической характеристики..... | 48 |
| 2.2.3 Определение основной теплофизической характеристики почв и ее гистерезиса | 51 |
| 2.2.4. Томографическая съемка образцов | 53 |
| ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ | 60 |
| 3.1 Основные свойства торфоземов Яхромской долины | 60 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1.1 | Зольность, степень разложения и угол смачивания торфоземов | 60 |
| 3.1.2 | Кривая водоудерживания торфоземов Яхромской долины..... | 64 |
| 3.1.3 | Основная теплофизическая характеристика торфоземов | 67 |
| 3.2 | Зависимость основной гидрофизической характеристики от основных свойств торфоземов | 68 |
| 3.2.1 | Гистерезис основной гидрофизической характеристики торфоземов ... | 80 |
| 3.3 | Экспериментальная оценка наличия гистерезиса основной теплофизической характеристики торфоземов..... | 86 |
| 3.4 | Томографическая съемка ненарушенных образцов торфоземов | 93 |
| | Заключение | 102 |
| | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 103 |
| | ПРИЛОЖЕНИЯ | 116 |

ВВЕДЕНИЕ

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 (Fariborz et al, 2012; Терлеев и др, 2021; Умарова, 2008, 2011; Роде, 1969; Глобус, 1969;; Судницын, 1979; Neilsen et al, 1989; Neilsen, 1991 и др.). Оценено влияние

физических и химических свойств на положение кривой водоудерживания или так называемой основной гидрофизической характеристики (ОГХ) (Назарова, 2009, Пузанова и др., 2014 и др.). В литературе представлены исследования по определению кривой ОГХ для органогенных почв (Моторин, 2017; Bohlin et al, 2004; Markoska et al, 2018; Schwärzel et al, 2002; Bechtold et al, 2018 и др.). 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; Dyukarev, 2019; Danelichen, 2013; Gasparim et al, 2005; Rao et al, 2005; Danelichen et al., 2011; Вебер et al., 2006 и др.). 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, которая может быть экспериментальной основой для использования математических моделей расчетной оптимизации температурного и водного режимов и использования торфяных почв. Результаты могут быть полезны в сельском хозяйстве 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.

По материалам научной работы опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах, включенных в списки Scopus, Web of Science.

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 - разбор 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 обсуждению 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.Д. Поздняковой за помощь в проведении экспериментов.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Торфоземы и их происхождение. Торфоземы Верхневолжской низменности

По происхождению торфяные болотные почвы разделяются на верховые, переходные и низинные. Данные болота отличаются по источникам питания. Верховые болота имеют выпуклую поверхность. При этом вода в них поступает в основном из атмосферных осадков, следовательно поступление каких-либо минеральных веществ минимально. Верховые болота обладают низкими плодородными свойствами, они имеют высокую кислотность, низкие значения зольности. В основном образованы мхами. В связи с этим вовлечение их земледелие не рационально, в основном их используют в качестве подстилок или топлива (Инишева, 2009). Переходные болота, как правило, образуются рядом с верховыми. При отсутствии возможности стекания, избыточная влага верховых болот застаивается на прилегающих территориях. При этом образуются переходные болота, на которых также происходит торфообразование. Они отличаются от верховых по своим свойствам, но незначительно. Кислотность переходных болот ниже, а зольность выше. Но при этом их также редко вовлекают в сельское хозяйство. Их оставляют в естественном виде.

Низинные болота находятся в понижениях рельефа, куда стекает вода и растительные остатки с прилегающих территорий. Они имеют вогнутую форму, получают минеральные вещества как из грунтовых вод, так и из выпадающих осадков. Это существенно влияет на отличия в их свойствах и пригодность для выращивания сельскохозяйственных культур. Их зольность значительно выше, а среда близка к нейтральной или слабокислой. Низинные болота образованы различными растениями, поэтому обладают разнообразным ботаническим составом. От режима питания болота зависит химический состав торфяной воды. Наблюдаются отличия в минерализации: для низинных свойственны более высокие значения $(18-29) \cdot 10^{-2}$ кг/м³, а для верховых $(4-7) \cdot 10^{-2}$ кг/м³ (Мисников, 2019).

Почвы, образовавшиеся на торфяных отложениях, при активном участии в почвообразовании вод разного происхождения и состава, разного ботанического состава и происхождения торфа (низинный, верховой и пр.), входят в отдел торфяных почв, торфоземы, в реферативную группу Histosols (Мировая реферативная база почвенных ресурсов, 2014). Они могут образовываться в условиях любого климата при наличии достаточного количества воды. В северных районах залегают под вечной мерзлотой (Moncharoen, 1985). Как правило, эти почвы на низинных торфах плодородны, активно используются в сельском хозяйстве, однако требуют применения разного рода интенсивных мелиораций, включающих агрохимические, гидротехнические и тепловые (Зайдельман, 1996).

Торфоземы – это трансформированные торфяные почвы в результате процессов мелиорации и сельскохозяйственного использования. При этом основная трансформация происходит в результате процессов деградации, в результате которых можно наблюдать уменьшение мощности торфяного слоя, разложение растительных остатков, а также уменьшение содержания органического вещества. При этом, при правильном дальнейшем использовании этих почв (севообороты, внесение удобрений), деградация будет ослабевать и их возможно будет использовать в сельском хозяйстве. В противном случае, эти процессы могут происходить быстрее, чем в минеральных («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2).

Торфяные почвы полесий обладают невысокой плотностью - 0,12-0,25 г/см³ («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2). При этом, в результате их интенсивного использования, плотность верхних горизонтов будет увеличиваться. Здесь возникает еще одно отличие торфяных почв от минеральных: в более глубоких горизонтах плотность будет ниже. У минеральных почв - обратная зависимость: верхний горизонт имеет наименьшее значение плотности, а с глубиной происходит ее увеличение.

Влагоемкость может достигать значений 300% и выше («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография). О.С. Мисников в своей статье (Мисников, 2019) отмечает, что наибольшая влагоемкость характерна для слаборазложившихся торфов, где растения не утратили своего анатомического строения. Плотность твердой фазы – около 2 г/см³ (1.6-2.2 г/см³) в зависимости от ботанического состава, пористость достигает 80-94%, а коэффициент пористости обычно менее 25. Гидрологические характеристики этих почв существенно различаются от традиционных: для торфоземов влажность завядания колеблется в пределах 1.7-2.5 % , а полевая влагоемкость – 55-85 % (к объему), а для минеральных – например, для среднесуглинистых почв (при плотности 1.2 г/см³) в среднем для указанных гидрологических параметров 15 - 17%, 32 -35 %. («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2; Шеин, 2005).

Такой важный физический показатель, как коэффициент фильтрации у торфяных почв полесий, также отличается от минеральных. Его значения могут меняться в зависимости от ботанического состава, степени осушенности болот от 0,2 м/сут до 600м/сут (неразложившийся моховой очес). («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2) Также для моховых торфов характерна наибольшая влагоемкость. (Мисников, 2019)

Таким образом, торфяные почвы по своим свойствам значительно отличаются от минеральных и требуется дополнительное изучение их свойств для рационального использования не только в сельском хозяйстве, но и в гражданском обустройстве городских ландшафтов и при создании почвенных конструкций.

1.2 Гидрологические режимы минеральных и органогенных почв полесий

Полесья, на которых в основном и представлены торфоземы, представляют собой ровные пространства, которые образовались в результате

деятельности ледника. При этом часть из них заболочена. В результате таяния ледников и образовавшихся водных потоков происходило размывание моренных отложений, образовывались отложения крупного и грубого материала. Далее течение откладывало отсортированный песок. Таким образом, большая часть отложений на почвах полесий песчаные, на которых произрастали леса (в основном сосновые). На данный момент основную часть занимают также леса и болота. При этом там преобладает избыточное увлажнение (Коллективная монография «Природообустройство полесья», под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2, 2019)

Минеральные почвы полесья

Сведения о гидрологических режимах необходимы для понимания возможности использования почв в сельском хозяйстве, определения норм поливов и осушения. Рациональное использование поможет собирать наибольшее количество урожая и определять, какие культуры будет лучше выращивать на каждом участке.

Основные почвы представляют собой песчаные, которые имеют свои особенности водного режима. Например, высокую воздухоемкость, низкие полевую влагоемкость и водоудерживание. На почвах легкого гранулометрического состава не рекомендуется принимать решения о необходимости иссушения по данным одного года. В зависимости от количества осадков уровень грунтовых вод может изменяться. Например, в годы со средним количеством осадков их уровень колеблется незначительно. В то время как в сухие года они опускаются, и в летние периоды может происходить иссушение верхних горизонтов до влажности меньшей чем ВРК. Таким образом, необходимо проводить комплексный анализ состояния водного режима, степени заболоченности легких минеральных почв. При этом всегда стоит обращать внимание на почвы, которые находятся на сопряженных участках, так как их гидрологические режимы связаны.

Большое значение будет иметь водный режим болот, в которых преобладают торфяные почвы. Иногда достаточно только их дренажа. Таким

образом, осушая торфяные заболоченные почвы, можно вовлекать в сельское хозяйство не только их, но и прилегающие минеральные почвы.

Одним из важных факторов при проведении мелиоративных мероприятий является уровень грунтовых вод. Это будет лимитирующим фактором в легких подзолистых почвах. Стоит учитывать, что во влажные годы может быть излишнее увлажнение, а в сухие годы - наоборот. Это поможет подбирать необходимые культуры для выращивания. В то же время сами дренажные системы стоит проектировать с учетом возможности регулирования уровня грунтовых вод. Не мало важна здесь и экономическая составляющая, так как в случае засушливого года урожайность может снизиться. Все эти факторы необходимо учитывать. Что касается минеральных почв, в настоящее время существует большое количество данных по механизмам движения влаги. Мы знаем влияние плотности, гранулометрического состава на водоудерживающую способность. Все это позволяет рассчитывать водные режимы и строить математические модели этих процессов. В то время как торфяные почвы также имеют большое значение при проектировании дренажных систем почв полесий, что влияет непосредственно на урожайность и экономическую составляющую. Рассмотрим основные гидрологические свойства торфяных почв полесий.

Торфяные почвы

Торфяные почвы отличаются от минеральных своими свойствами и происхождением. Они образуются за счет скопления растительных остатков, которые консервируются в анаэробных условиях. В зависимости от растений торфо-образователей торфяные почвы будут отличаться по ботаническому составу. Например, древесные торфы образуются на участках бывших лесов, в них мы можем обнаружить остатки древесной растительности. В то время как гипновые торфы образованы специфическими гипновыми мхами. Они будут представлять собой волокнистую структуру.

При этом нельзя забывать, что в естественной среде они переувлажнены и там преобладают анаэробные условия, растительные остатки

аккумулируются и накапливаются. В таком виде их использование в сельском хозяйстве невозможно. Для этого их необходимо осушать. При этом понизится влажность, анаэробные условия сменятся аэробными. Накопление растительных остатков прекратится и будет происходить противоположный процесс – разложение. В связи с этим будет происходить и изменение основных физических свойств (усадка, температура) торфяных почв, которые необходимо изучать для их более рационального использования. При этом будет также изменится влажность осушенных торфяников. Оптимальная влажность для растений считается равной 70% наименьшей влагоемкости. При этом ее значение у осушенных и неосушенных торфяных почв будет отличаться.

Одно из основных изменений — это содержание органического вещества. При вовлечении торфов в севооборот они начинают деградировать, содержание органического вещества (ОВ) уменьшается. В зависимости от растений, используемых на территориях, скорость этого процесса может быть разной. Наиболее медленно этот процесс происходит при засевании травами, однако это не спасает полностью от потери ОВ. Оно будет неизбежно уменьшаться. На этот процесс также будет влиять влажность и уровень грунтовых вод. Снижение обоих составляющих будет увеличивать скорость разложения органического вещества торфа. Все это необходимо учитывать при вовлечении торфяных почв в сельское хозяйство. Необходимо изучать их гидрологические режимы, водоудерживающую способность. Знать ее изменение в зависимости от основных свойств торфяных почв. Вероятно, влияние будет оказывать ботанический состав торфов, зольность, плотность.

1.3 Основная гидрофизическая характеристика почв

Содержание воды в почве имеет большое значение в сельском хозяйстве. Влага должна не просто находиться в почве, но и быть в доступной для растений форме. В противном случае растения не смогут развиваться. С водой к корням растений поступают питательные вещества. Оптимальное

содержание воды влияет на дыхание корней. В зависимости от влажности следует правильно подбирать культуры, которые можно выращивать. Также влажность и гидрофизические свойства помогают оптимально использовать поливную воду. В случае с торфяными почвами влажность имеет особое значение. Часто они переувлажнены и для вовлечения в сельское хозяйство их необходимо осушать. Для этого необходимо знать гидрофизические свойства, особенности строения и какие факторы оказывают на них более существенное влияние.

Для характеристики минеральных почв часто используют основную гидрофизическую характеристику (ОГХ). Это одна из основных характеристик, которую используют для количественного описания гидрологических свойств почв. Основная гидрофизическая характеристика – изотермическая равновесная зависимость объемной влажности почвы от капиллярно-сорбционного (матричного) давления почвенной влаги, выраженного, как правило, в единицах pF (Шеин, 2005).

«Капиллярно-сорбционный потенциал влаги – это понижение давления воды в почве под действием капиллярно-сорбционных сил почвы, приводящее к подъему воды в почвенных капиллярах и образованию прочносвязанных водных пленок около почвенных частиц» (Шеин, 2005, стр. 126). В качестве единиц измерения в большинстве случаев используются сантиметры водного столба (см водного столба).

ОГХ представляют в виде графика. Несмотря на то, что это зависимость влажности от давления почвенной влаги, в России по оси абсцисс откладывают значение влажности, а по оси ординат – значение давления влаги, которое выражают в виде pF – десятичный логарифм от абсолютной величины капиллярно-сорбционного давления влаги, хотя в мировой практике, – напротив, объемная влажность (ордината), а давление влаги (абсцисса). Значения влажности используют как в весовых (массовая влажность в процентах), так и в объемных (объемная влажность в процентах) единицах. Отметим, что при проведении экспериментального определения ОГХ

влажность является зависимой величиной, поэтому ее обычно откладывают по оси ординат. Давление влаги задается самостоятельно, и оно является величиной независимой - аргумент, который откладывают по оси абсцисс. (Rattan et al., 2004; Bolt, 1976; Campbell, 1979). Так, при определении ОГХ в большинстве методов мы самостоятельно задаем значение давления и ждем наступления равновесия, чтобы значение влажности было постоянным, т.е. не изменялось достаточно долгое время. Таким образом, мы получаем равновесную зависимость между парами значений «давление влаги-влажность».

Кривую ОГХ нередко называют кривой водоудерживания (это прямой перевод с англоязычного “water retention curve”). Водоудерживание исследовали в течение десятилетий (Роде, 1969; Глобус, 1969; Качинский, 1970; Судницын, 1979; Воронин, 1984, 1986; Шеин, 2005; Умарова, 2008, 2011 и др.). Эти исследования являются основой для количественного описания явлений передвижения и удержания воды в почвах.

Водоудерживание — это способность почвы удерживать влагу в основном капиллярно-сорбционными силами; нередко указывают, что это влажность почвы при определенном капиллярно-сорбционном или матричном давлении влаги. Из определения видно, что чем выше влажность, которая соответствует одному значению давления, то есть чем правее лежит кривая в указанных осях «объемная влажность – давление влаги», тем выше будет водоудерживающая способность почвы.

Многие исследователи подчеркивают, что водоудерживание - одно из основных свойств почвы, которое помогает изучать доступность влаги растениям, водный режим, перенос веществ в почве с помощью влаги, дренаж. Все эти факторы важны для изучения вегетации растений. Водоудерживание показывает, как почва может накапливать и сохранять водные запасы, которые являются одним из основных факторов для жизни. (Neilsen и др., 1989; Neilsen, 1991)

Кривая ОГХ имеет s-образный вид и характерные точки перегиба, такие как давление входа воздуха в нижней части кривой и при переходе пленочно-капиллярной влаги к сорбционной в верхней части кривой (Воронин, 1986; Шеин, 2005).

Для минеральных почв кривая водоудерживания хорошо изучена: ее общая форма, характерные области и изменение положения в зависимости от основных свойств почв. Это позволяет использовать такие свойства как гранулометрический состав, плотность и содержание органического вещества в качестве педотрансферных функций и воспроизводить кривую ОГХ без лабораторного определения, которое является трудоемким и длительным процессом. (Умарова и др., 2014) В то время, как для органогенных почв нет таких подробных данных, которые позволяли бы полноценно моделировать почвенные процессы движения влаги.

При математическом описании S - образной формы кривой ОГХ используют уравнение ван Генухтена (van Genuchten, 1980):

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha P_{k-c})^n]^m}$$

; (1), где Se – приведенная влажность; θ – влажность, соответствующая давлению P_{k-c} ; θ_r – остаточная влажность; θ_s – влажность насыщения; P_{k-c} – капиллярно-сорбционное давление; $m = 1 - 1/n$; n – отражает распределение пор по размерам (параметр аппроксимации ОГХ); α – величина, обратная давлению входа воздуха (параметр аппроксимации ОГХ). Параметры аппроксимации получают в программе RETC (van Genuchten и др., 1991).

Для моделирования процессов переноса тепла и влаги, а также переноса солей используют математическую модель Hydrus 1D. При моделировании программа решает основное уравнение движения влаги в почве – уравнение Ричардса (Шеин, 2005).

Hydrus 1D используют при моделировании и анализе движения воды в различных средах: полностью, частично и не насыщенными влагой. При этом мы можем создавать неоднородные области, через которые будет проходить

влаги. Граничные условия также можно задавать самостоятельно. Это могут быть как контролируемые атмосферные условия, так и условия свободного дренажа. Поток может идти в различных направлениях: горизонтальном, вертикальном и наклонном (Simunek и др., 1998).

Помимо одномерного моделирования в Hydrus 1D, возможно моделирование как в двух, так и в трехмерном пространстве. В свою очередь, оно требует более полных данных о начальных и граничных условиях, а также свойствах почв в разных направлениях (Simunek и др., 2008).

Для минеральных почв хорошо изучено влияние их свойств на положение и форму кривой ОГХ. Например, в работе Назаровой (2009) показано, что наблюдается существенное снижение водоудерживающей способности дерново-подзолистых почв, которые используются в сельском хозяйстве. Основные отличия положения кривых находятся в области высоких влажностей. Наименьшее влияние наблюдается на участках, где выращивали рожь и добавляли удобрения. Автор объясняет эти отличия особенностями выращиваемых растений: рожь имеет хорошо развитую корневую систему, что является дополнительным источником органического вещества наряду с удобрениями. В то же время можно оценить и влияние плотности на ОГХ минеральных почв. В более рыхлых почвах количество крупных капилляров будет увеличиваться, и они будут удерживать большее количество влаги (Назарова, 2009, Шеин 2005).

На положение кривой ОГХ оказывает большое влияние и наличие органического вещества. Его влияние зависит от исходной дисперсности субстрата. Органическое вещество увеличивает водоудерживающую способность почвы прежде всего за счет своего агрегирующего воздействия. Распространен такой прием, как смешивание органического и минерального субстратов. Чаще всего используют песок. При увеличении содержания органического вещества происходит практически равномерное смещение кривой вправо. По-видимому, органическое вещество выступает в роли структурообразующего агента. Происходит склеивание грубодисперсных

минеральных ЭПЧ в рыхлые агрегаты (органогенная цементация), что также неминуемо отражается на водоудерживающей способности и физическом состоянии легких почв, в особенности супесчаных.

При сравнении водоудерживающей способности горнолесной темносерой и более легкого по гранулометрическому составу чернозема выявлено, что у первых она выше, особенно в области, близкой к состоянию насыщения почвы влагой (при высоких давлениях влаги), что объясняется повышенным содержанием гумуса, лучшей структурированностью, более высокой порозностью и меньшим содержанием водорастворимых солей в горно-лесной почве (Пузанов и др., 2014).

Кривая ОГХ несет в себе информацию о многих почвенных свойствах. В связи с этим ее можно использовать для:

1. Сравнительной оценки изменения физического состояния почвы.

Основная гидрофизическая характеристика тесно связана с минералогическим и химическим составом элементарных почвенных частиц, с удельной поверхностью почвы, с ее гранулометрическим микроагрегатным и агрегатным составом, т. е. со всеми уровнями структурной организации твердой части почвы вплоть до горизонтного.

2. По кривой ОГХ минеральных почв возможно оценить распределение пор по их диаметрам.

Давление почвенной влаги соответствует капиллярному поднятию, его высота связана с радиусом капилляра формулой Жюрена (2): $h = \frac{0.15}{r}$. Зная, что h – давление почвенной влаги или величина капиллярного поднятия, рассчитывается радиус пор – r .

Имея график зависимости капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги от объемной влажности почвы, также нетрудно вычислить объем пор определенного диаметра. Для этого необходимо отметить рассчитанные значения P на оси ординат полученного графика и провести из найденных точек прямые, параллельные оси абсцисс, до пересечения их с

кривой водоудерживания, после этого спроектировать точки пересечения на ось абсцисс и графически определить объем пор заданного диаметра.

3. Оценки почвенно-гидрологических констант.

В нашей стране понятие *почвенно-гидрологических констант* (ПГК) появилось еще в прошлом веке (Абрамова, 1953; Воронин, 1984; Качинский, 1970; Роде, 1960, 1961;). Большое внимание гидрологическим константам уделял А.А.Роде в своей книге «Основы учения о почвенной влаге», выпущенной в 1969 году. В настоящее время выделяют следующие константы:

- гигроскопическая влажность (ГВ, $W_{г}$) – влажность образца почвы в лабораторных условиях;
- максимальная гигроскопическая влажность (МГ, $W_{мг}$) - влажность образца почвы атмосфере с относительной влажностью 98%;
- влажность устойчивого завядания (ВЗ, $W_{вз}$) - влажность почвы, при которой растения необратимо завядают;
- влажность разрыва капилляров (ВРК, $W_{врк}$) – влажность почвы, при которой уменьшается подвижность влаги в процессе снижения влажности;
- наименьшая влагоемкость (НВ) – наибольшее количество влаги, которое почва может удерживать капиллярными силами после стекания гравитационной влаги. В смежных науках (например, в мелиорации почв) нередко используют другие исторические названия НВ, например, ППВ – «предельно полевая влагоемкость». Физически наиболее точное название, - англоязычное, “field capacity”, «полевая влагоемкость», так как эта величина определяется наиболее точно и обоснованно в полевых условиях.
- капиллярная влагоемкость (КВ) – наибольшее количество влаги, которое почва может удерживать в зоне капиллярной каймы грунтовых вод в неподвижном состоянии после свободного стекания влаги;
- полная влагоемкость (ПВ) – наибольшее количество влаги, содержащиеся в почве при полном заполнении всех пор, за исключением занятых «защемленным» и адсорбированным воздухом.

Кривая ОГХ позволяет определять ПГК. Величина НВ одна из основных характеристик водоудерживающей способности. Под действием сил гравитации, избыточная влага перетекает в нижележащий слой, в котором также устанавливается своя наименьшая влагоемкость и т.д. Именно эти значения НВ говорят нам о промачивании почвы после полива и осадков (Умарова, 2008). В мировой литературе принято считать, что НВ – это влажность, соответствующая в среднем -330 см водн. ст. (Шеин, 2005). Но на эту величину оказывает существенное влияние гранулометрический состав и в зависимости от него величина может изменяться от -50 до -100 сантиметров водного столба у песчаных почв, до -500 у глин. Влажность завядания растений на кривой ОГХ соответствует давления около -15000 сантиметров водного столба.

По А.Д.Воронину (Воронин, 1986), каждая форма воды в почве соответствует некоторой энергетической константе, которой, в свою очередь, соответствует капиллярно-сорбционное давление влаги.

4. Математического моделирования передвижения влаги в почве.

ОГХ используется в математических моделях для расчетной оптимизации водного режима почв, для моделей засоления/рассоления, мелиоративных прогнозов, в сельском хозяйстве, гидрологии. В условиях крупных городов знание водоудерживающих свойств почвы необходимо для создания почвенных конструкций.

5. Оценки физико-химических констант в почве.

В настоящее время, для сокращения экспериментальных работ, существуют способы расчета водоудерживания с помощью моделей пористых сред. В одном случае кривую водоудерживания восстанавливают по химическим и физико-механическим характеристикам твердой фазы (Зейлигер и др., 1995). Во втором случае активно развиваются подходы, основанные на расчетах характеристики влагопроводности по характеристике водоудерживания (Bruce, 1972).

Кривые водоудерживания имеют большое практическое и теоретическое значение, поскольку они показывают данные о свойствах воды в субстрате. Эти кривые позволяют определить, когда и какое количество воды необходимо растению. Таким образом, мы можем увидеть связь между водой, субстратом и растениями (Markoska et al., 2018).

1.3.1 Основная гидрофизическая характеристика торфяных почв

Исследование водного режима торфяных почв на данный момент имеет обрывочный характер. Согласно А.С. Моторину (2017), водно-физические свойства осушаемых почв отличаются между собой. Имеет значение тип почвы, мощность торфяной залежи положения в рельефе, уровень грунтовых вод. Так, например, содержание влаги в пахотном горизонте торфянисто-глеевой почвы близко к нижнему пределу, в то время как в среднемошной торфяной почве содержание влаги находится в более оптимальном диапазоне для растений - 0,73НВ. В то время как маломощная находится в переходном состоянии - 0,67НВ. Автор связывает такие различия влажности со степенью разложения. Указывается, что более влажные почвы имеют более низкую степень разложения. Если рассматривать такие почвы вниз по профилю, то наблюдается значительное изменение содержания влаги. Это говорит о том, что наиболее значительные изменения влажности характерны для пахотного горизонта (Моторин, 2017).

Торфяные почвы относятся к крупнопористым средам. Их часто используют в смесях для почвенных конструкций, чтобы обеспечить оптимальные условия для каждого растения. В составе с другими компонентами они образуют единое целое, дополняя по свойствам друг друга. Физические свойства торфа, такие как низкая плотность, высокая водоудерживающая способность, относительно высокая емкость катионного обмена, делают торф одним из наиболее благоприятных субстратов для выращивания сельскохозяйственных культур или садоводства (Bohlin et al., 2004). При этом, в его использовании есть и свои минусы, например то, что он является благоприятной средой для различных болезней. Такие меры как

стерилизация почвы перед ее использованием не являются эффективными, в связи с тем, что образовавшийся биологический вакуум, который может заполняться патогенными грибами. (Abad et al., 2001). Несмотря на это, торф активно используется в садоводстве в настоящее время. При этом торфяники, на которых его добывают, представляют собой важную и хрупкую экосистему. Они являются средой обитания растений и животных, выступают в роли поглотителей углекислого газа. Все это говорит о том, что необходимо правильно их использовать, чтобы антропогенное воздействие не вызывало преждевременную деградацию. Все эти факторы подвергают сомнению добычу торфа в ближайшем будущем (Barber, 1993; Maher et al., 2008). Торф является наиболее широко используемой средой для выращивания и компонентом субстрата в садоводстве, в настоящее время на него приходится 77–80% сред, ежегодно используемых в садоводческой промышленности Европы (Gruda, 2012; Markoska et al, 2018).

Саженьцы и трансплантаты выращивают преимущественно на органических субстратах на основе торфа, он также используется в садоводстве в качестве сырья для субстратов, в которых выращиваются контейнерные растения (Gruda, 2005). Торф уже давно используется как компонент стандартизированных сред; однако исследования 1960-х годов показали, что его можно использовать как среду выращивания как для контейнерных растений, так и для выращивания овощей и срезанных цветов (Puustjarvi, 1977). Торфяные субстраты обладают многочисленными преимуществами, и их содержание питательных веществ и pH легко контролировать, поскольку они изначально низкие (Markoska et al., 2018).

При сравнении торфа с другими пористыми средами у него наблюдается более высокая водоудерживающая способность. Это связывают с содержанием в нем органического вещества, благоприятствующего проявлению удерживающих влагу макропор и мезопор. Ряд авторов сравнивает его с перлитом, пористой средой, используемой в качестве подложки в почвенных конструкциях. Торф при этом во всех точках кривой

имеет более высокое водоудерживание, за исключением точки, соответствующей влажности завядания. В ней наблюдается более высокое значение влажности у перлита, по сравнению с торфом (Markoska et al., 2018).

Для использования торфяных почв в земледелии их осушают. При этом изменяются их свойства. С.М. Зайко, Л.Ф. Вашкевич и С.С. Бачило (Зайко и др., 2001) было проведено многолетнее исследование торфяных осушенных почв республики Беларусь. По всему профилю происходит уплотнение. При этом наибольшие изменения наблюдаются в пахотном горизонте. При воздействии техники происходит перемешивание этого горизонта, вспашка измельчает растительные остатки. В зависимости от длительности использования данные изменения пахотного горизонта наиболее заметны. При этом закономерно изменяются и водно-физические свойства. При осушении изменяется уровень грунтовых вод, понижается влажность, уменьшаются запасы продуктивной влаги. То есть основные свойства ухудшаются и наблюдается деградация торфяных почв прежде всего в виде осадки торфяной толщи. Наибольшие изменения происходят в первые годы после осушения. При этом происходит не только увеличение минерализации торфяных почв, но и грунтовых вод. Происходит вымывание веществ, которые образуются при минерализации, также внесение удобрений способствует данному процессу. Таким образом, антропогенное воздействие приводит к значительному изменению свойств. Происходит трансформация почв. Торфа трансформируются в торфоземы. При этом происходит уменьшение мощности торфа. Все эти процессы остановить полностью невозможно, используя торфяные почвы, возможно лишь замедлить, применяя научно обоснованные методы агротехнологий, направленные на сохранение торфоземов как уникальных почвенных объектов. В частности, методы, направленные на сохранение торфов и торфоземов от пожаров (Зайдельман, 2011) в виде (1) двойных систем регулирования водного режима, (2) использования торфяных почв в качестве зеленых угодий.

Многие исследования показывают, что регулирование уровня грунтовых вод может существенно влиять на выброс углерода (Walter et al., 2001; Renger et al., 2002; Lafleur et al., 2005). Восстановление и хорошо сбалансированное управление торфяными почвами требует глубокого понимания вовлеченных гидрологических процессов (Joris and Feyen, 2003; Schwärzell et al., 2006).

1.3.2 Гистерезис основной гидрофизической характеристики почв

Гистерезис кривой водоудерживания (т.е. неравнозначность кривых ОГХ в процессах иссушения и увлажнения) может сильно влиять на перенос растворенных веществ в ненасыщенных средах. Это явление часто наблюдается во многих лабораторных экспериментах (Fariborz et al., 2012). Понятие гистерезиса связано с изменением формы положения кривой ОГХ в зависимости от того, в каком режиме она была получена или наблюдалась: иссушение или увлажнение. В ряде природных ситуаций, например, при орошении, это явление имеет большое значение, так как сказывается на определении предполивного порога, - т.е. влажности или давления влаги, при которых следует производить полив. Основными причинами гистерезисного поведения кривой водоудерживания являются следующие: различные углы контакта воды с твердым телом во время циклов смачивания и сушки, а также высокая изменчивость как размера, так и формы пор почвы, количество воздуха, захваченного в поровом пространстве; явления набухания или сжатия отдельных твердофазных частиц (Romano, 1999). Такое поведение является важным для расчета норм полива почвы. Особенно важное значение оно имеет для торфяных почв. Они являются крупнопористыми и подверженными ярко выраженным процессам набухания и усадки. При сильном иссушении торфа достигают того значения влажности, при котором становятся гидрофобными и не смачиваемыми, что приводит к сильному изменению кривой водоудерживания. Все эти эффекты диктуют необходимость дальнейшего изучения гидрофизических свойств торфяных почв. Такого рода исследования актуальны. Действительно, торфяные почвы в большой мере подвержены

процессам усадки и набухания, т.е. процессам изменения структуры порового пространства в зависимости от его направления (увлажнения или иссушения). Этот процесс гистерезиса изучается уже довольно давно и разносторонне для минеральных почв и в основном с гидрологической точки зрения, как некоторое теоретически обоснованное средство экономии воды. Так, если почва иссушается (т.е. процесс идет по кривой иссушения ОГХ), то при влажности около 70%НВ должен производиться полив определенным количеством воды, равным $(НВ-70\%НВ) \times (\text{плотность почвы}) \times (\text{мощность промачиваемого слоя})$. Естественно, величина НВ используется для расчетов, находящихся на кривой иссушения почвы. Но в процессе полива почва ведет себя гидрологически на основании кривой увлажнения. Значит, и величину НВ, которую необходимо использовать для расчета нормы полива, необходимо использовать, основываясь на кривой ОГХ, но процесса увлажнения. А это, как правило, величина более низкая, чем НВ на кривой ОГХ при иссушении, особенно для торфяных почв, т.е. теоретически поливать нужно меньшим количеством воды, если учитывать гистерезис. На этом основаны мелиоративные мероприятия по экономии поливной воды при расчетах нормы полива с учетом явлений гистерезиса (Терлеев и др., 2021). Эти расчеты с гистерезисными явлениями позволяют экономить до 20% и выше поливной воды на минеральных почвах. Видимо, на торфяных почвах возможности экономии поливной воды еще более выражены за счет того, что гистерезисная петля в этих почвах выражена более заметно, чем на минеральных. Однако о гистерезисных явлениях в торфоземах, об изменении их структуры порового пространства мало известно. Это вызывает необходимость более детально исследовать гистерезис торфоземов, что и составило одну из задач работы.

Гистерезис как гидрологическое явление может оказывать существенное влияние и на тепловые процессы в почвах, учитывая, что гидрология почв через объемы влажности связана с тепловыми явлениями (нагревание почв, проникновения тепловой волны и др.). Так, опытным путем

доказано, что осушаемые дренажем торфяные почвы более быстро прогреваются и поэтому являются более плодородным, что связано с меньшим количеством воды в этих почвах (Киндерис и др., 1975). Действительно, можно считать теоретически доказанным и экспериментально подтвержденным (Архангельская, 2012; Воронин, 1986), что существует функциональная связь и взаимообусловленность гидрологических и тепловых явлений. Так, в качестве отдельного члена уравнения теплоемкости C_v представлена теплоемкость воды C_{vw} и её объемная доля f_w (Шеин, 2005; Воронин, 1986):

$$C_v = f_s C_{vs} + f_w C_{vw} + f_a C_{va}, \quad (3)$$

где f_s, f_w, f_a – объемные доли твердой фазы, воды и воздуха; C_{vs}, C_{vw}, C_{va} – соответствующие этим фазам объемные теплоемкости.

В то же время объемная доля воды (т.е. влажность при одном и том же давлении влаги) будет преимущественно определяться направлением процесса - иссушением или увлажнением, т.е. гистерезисом. Учитывая, что член вышеприведенной формулы $f_w C_{vw}$ существенно определяется влажностью почвы, следует предполагать, что при иссушении этот член будет иметь большее значение, чем при увлажнении, учитывая гистерезисные явления в торфоземах. Поэтому можно предполагать, что процесс проникновения тепловой (или температурной) волны в торфоземах будет медленнее при иссушении почвы (ветвь иссушения гистерезиса), чем при увлажнении, так как ветвь увлажнения почвы характеризуется меньшей влажностью почвы, чем при иссушении. К сожалению, влияния гистерезисных явлений на теплофизическое поведение почвы изучено весьма слабо, не имеется данных о тепловых явлениях в почвах иссушающихся или увлажняющихся, т.е. подверженных явлениям гистерезиса, о возможной роли этого процесса в явлениях прогрева торфяных почв. Это должно составить еще одну задачу работы.

Одна из характерных особенностей торфяных почв — это высокое содержание органического вещества и пористость (до 97%). При снижении

влажности происходит усадка, при ее увеличении – набухание. Все это влечет за собой изменение его порового пространства. Содержание органического вещества и влажность влияют на водоотталкивающую способность (при низкой влажности она возрастает) (Doerr и др., 2000). Усадка и водоотталкивающие свойства усиливают эффекты гистерезиса и могут быть обратимыми или необратимыми (Schwärzel и др., 2002, Bechtold и др., 2018). Эти процессы также исследованы далеко не детально, с учетом ботанического состава, плотности, зольности торфяных объектов. В связи с этим они были выбраны в качестве объектов исследования в данной работе.

Таким образом, основными факторами, влияющими на водоудерживание минеральных почв, являются гранулометрический состав, плотность, органическое вещество, состав почвенного поглощающего комплекса и минералогический состав. Что касается органогенных почв, в настоящее время нет полноценных данных, чтобы рассчитывать и моделировать процессы, происходящие в торфяных почвах. Поэтому необходимо не только изучать имеющиеся литературные данные, но и проводить дополнительные экспериментальные исследования, которые помогут выявить влияние основных свойств торфяных почв на положение кривой ОГХ. В настоящей работе были поставлены 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.*

1.4 Тепловой режим торфяных почв

Почвенная система является сложным и динамичным объектом. В почву входят различные минералы, органическое вещество, жидкая среда, газообразная среда. Когда речь идет о тепловом режиме почв, мы должны учитывать все эти факторы. Все они, в большей или меньшей степени, будут

влиять на количество тепла в почве. Влияние также будут иметь физические, химические и биологические характеристики почв. Для минеральных почв — это, в первую очередь, фракции песка, глины и ила. В случае торфоземов, будут играть большую роль растения торфообразователи, влажность, органическое вещество, степень разложения. Тепловой режим является одним из основных факторов, влияющим на произрастание растительности, поглощение воды и питательных веществ, микробную активность, круговорот питательных веществ, рост корней и многие другие процессы (Doran, Smith, 1987). На температуру почвы влияют не только внутренние составляющие и свойства самой почвы, но и внешние: климат, метеорологические изменения, суточные и годовые циклы изменения температуры. В том числе, непостоянные изменения погоды, например, засуха или, наоборот, обильные дожди и длительная холодная погода. В зависимости от глубины также происходят изменения температуры. На поверхности наблюдаются более сильные колебания, которые носят синусоидальный характер, в то время как с глубиной колебания температуры затухают и становятся менее заметны. (Mahdi et al., 2017).

Торфяные почвы представляют собой сложную пористую систему. Она состоит из большого количества влаги, пор и органических остатков. При осушении торфяников изменяются их свойства, водные режимы, что неизбежно влияет на изменение и температурного режима. Чтобы понимать, какие именно происходят в результате этого изменения, необходимо знать теплофизические свойства.

Тепловой режим почв тесно связан с тепловым балансом. Солнце - главный источник энергии. От него поступают различные виды радиации, которые затем преобразуются в тепловую на поверхности почвы. Далее происходит нагревание почвы. Основные виды солнечной радиации, поступающей на поверхность: прямая, рассеянная и отраженная (Шеин, 2005; Архангельская, 2012).

Формула теплового баланса почвы в общем виде:

*(Прямая солнечная радиация) + (Рассеянная солнечная радиация) + (Противоизлучение атмосферы) – (Отраженная солнечная радиация) – (Излучение почвой тепла) – (Конвективный нагрев приземного слоя атмосферы) – (Потери тепла на испарение и транспирацию) – (Поток тепла в почву) = 0.*¹ (Шеин, 2005)

Не вся поступающая радиация поглощается почвой. Часть ее отражается. Для характеристики отраженной радиации существует коэффициент Альбеда. Это отношение отраженной радиации к поступившей. (Шеин, 2005). В зависимости от типа почв этот коэффициент будет отличаться. Темные поверхности будут отражать меньше энергии, чем более светлые. Торф используют в качестве материала, которым покрывают почву, чтобы увеличить количество поступившей в нее энергии. Для коэффициента Альбеда помимо цвета большое значение имеет также влажность деятельной поверхности: снижается при ее увеличении. Однако не все так однозначно. Также будут влиять и другие факторы, например, угол, под которым падают солнечные лучи, насколько поверхность гладкая или шероховатая. Все это говорит о том, что антропогенное воздействие будет сильно влиять на тепловой режим. Такие факторы, как дренаж, вспашка, посадка зеленых

¹ В формуле имеются составляющие, которые показывают потоки тепла, направленные к поверхности и от нее за конкретный промежуток времени. И описывают дневное время. Как мы видим из уравнения, в нем присутствуют члены, которые зависят непосредственно от поверхности почвы; при изменении ее свойств значения параметров могут изменяться. Поверхность почвы играет важную роль в нагревании приземного слоя воздуха. На перенос тепла также влияет влажность почвы; чем выше влажность почвы, тем больше тратится тепла на испарение, соответственно меньше тепла для нагревания самой почвы. Как уже было сказано, дренированные почвы, в том числе торфяные, прогреваются быстрее. Поэтому одним из мелиоративных мероприятий по ускорению прогрева почвы считается удаление избытка почвенной влаги, т.е. дренаж (Зайдельман, 1996). В этом наблюдается связь водного и теплового режимов почв.

растений будут изменять взаимодействие почвы и атмосферы, следовательно, изменять тепловой баланс и изменять температуру почвы.

По тепловым свойствам почвы можно разделить на «теплые» и «холодные». К первым можно отнести песчаные почвы. Они быстро прогреваются и также быстро охлаждаются, имеют меньшую влажность и большие значения теплопроводности. К холодным почвам можно отнести глинистые почвы. Они, как правило, имеют большие значения влажности, меньшие значения теплопроводности. Прогреваются значительно медленнее, чем песчаные.

Рассмотрим по литературным источникам, как влияют основные свойства торфа на его теплофизические свойства. В том числе, в чем состоят основные отличия от минеральных почв.

В исходном виде торфяники сложно использовать в сельском хозяйстве. Их предварительно осушают, что неизбежно влияет на их свойства. Одно из основных изменений — это снижение уровня грунтовых вод, что ведет к снижению влажности, изменению аэробных условий, увеличению степени разложения. Изменение исходных данных по увлажнению приводит также к изменению биотических и абиотических свойств, что неизбежно влечет за собой деградацию органического вещества. Именно оно отвечает за долгосрочное хранение углерода и доступность питательных веществ для растений. Содержание органического вещества в торфах, как правило, высокое. Теплопроводность его меньше по сравнению с обычными минералами. Также торфоземы относятся к более рыхлым почвам, даже несмотря на уплотнение пахотных горизонтов при использовании в сельском хозяйстве. Согласно А.И. Позднякову (2014), плотность торфоземов Яхромской долины составляла 0,3-0,5 г/см³ в зависимости от ботанического состава. Теплопроводность рыхлых почв также ниже, чем плотных. Таким образом, в зимний период глубина промерзания торфоземов будет меньше, по сравнению с минеральными, но и оттаивание будет происходить медленнее (Инишева, 2001; Dyukarev и др., 2019). Тепловой поток органогенных почв

практически аналогичен минеральным, поэтому данные отличия обусловлены, в первую очередь, тепловыми свойствами самих торфяных почв и их состоянием влажности (Инишева, 2001; Романов, 1961).

Одним из свойств почвы, характеризующим тепловой режим, являются температура и коэффициент температуропроводности. В данный момент исследованию именно этих параметров уделяется меньшее внимание. Они необходимы для многих расчётов подземных экосистемных процессов, в том числе рост и дыхание корней. Также температура влияет на скорость роста семян и корней, развитие микроорганизмов, на воду в почве. Однако не все метеостанции собирают данные о температуре почвы (Doran, Smith, 1987; Mahdi et al., 2017). Температура почв отличается в зависимости от их свойств, в том числе это плотность, химический состав и т.д. При регулярном измерении температуры почвы на разных глубинах можно получить графики изменения температуры с течением времени. Наблюдать сильные ли перепады происходят в течение суток, недель, месяцев. Зная послойные значения температуры, можно рассчитать коэффициент температуропроводности почв (Danelichen et al., 2013; Gasparim et al., 2005; Rao et al., 2005; Danelichen et al., 2011; Weber et al., 2006). Температуру почвы используют при моделировании движения тепла в почвах. Она неизменно связана с влажностью. Для торфоземов эта связь особенно актуальна. Влажность является одним из основных свойств этих почв. Влияние влажности на коэффициент температуропроводности имеет куполообразную зависимость. Температуропроводность начинает возрастать с увеличением влажности. Один из наиболее ярко выраженных в почве механизмов переноса тепла представлен кондукцией. Наибольший контакт между частицами достигается при влажности близкой к ВРК, и за счет этого температуропроводность возрастает, достигая максимума. При дальнейшем увеличении влажности контакт между частицами будет ослабевать, температуропроводность и теплопроводность также будут снижаться (Шеин, 2005). Температура также важна, потому что именно она отвечает за скорость нагрева профиля почв.

Почвы с высоким коэффициентом температуропроводности прогреваются в глубину быстрее, чем почвы с низким коэффициентом. У вторых наблюдается большая разница между температурой на поверхности и температурой на глубине. Торфяные почвы относятся к таким почвам. Эта одна из причин быстрого прогрева почв в теплое время и медленного охлаждения в холодное. При высыхании теплопроводность торфа значительно снижается и торф может служить теплоизолятором в почвенных конструкциях (Arkhangelskaya, Gvozdkova, 2019).

Осушенные торфяные почвы отличаются от нетронутых торфяников. В окультуренных почвах будет повышенное содержание минерального вещества. Это происходит из-за минерализации торфа. Иногда для улучшения тепловых свойств почв вносят песок. На теплопроводность влияние оказывает наличие воды, льда и воздуха. Как известно, вода проводит тепло намного лучше, чем воздух, поэтому ее роль в значениях теплопроводности будет более значительной. Ряд исследований показывает, что теплопроводность возрастает при увеличении влажности. В торфяных почвах большое количество пор будет заполнено воздухом, большое содержание органического вещества. На данный момент известно, что теплопроводность минеральных почв выше, чем органогенных; наибольшая разница заметна с почвами, содержащими кварцевые минералы. Что еще раз говорит о том, что увеличение содержания минеральных веществ будет увеличивать теплопроводность торфа. Если вода представлена в почве льдом, то теплопроводность торфа будет близка к теплопроводности льда (Mustamo et al., 2019).

Особое внимание стоит уделить промерзанию торфяных почв и изменению коэффициента температуропроводности. На температуру будет влиять не только температура воздуха, но и наличие снежного покрова. Если его мощность незначительная, то промерзание будет более глубоким. Снежный покров выступает в роли изолирующего барьера и препятствует поступлению в почву холодного воздуха, поэтому его изменения также

вливают на температуру. Уменьшение может привести к большему охлаждению почвы (Wisser et al., 2011). В период наступления ранней зимы мощность снежного покрова будет еще незначительной, что приведет к более активному промерзанию почвы (Инишева, 2001). Изучение тепловых свойств мерзлых торфяных почв актуально также в связи с климатическими изменениями. В настоящее время часть земель, покрытых мерзлотой, представляет собой именно торфяные почвы, оттаивание которых требует знания их свойств, понимания, как с ними работать, использовать и, главное, знать их теплофизические свойства, для предсказания поведения таких массивов при глобальном потеплении.

Зависимость температуропроводности от влажности нередко называют основной теплофизической характеристикой почвы (Архангельская, 2004). Температуропроводность k , $\text{см}^2/\text{с}$, $\text{см}^2/\text{сут}$) представляет собой отношение теплопроводности к теплоемкости: $k = \frac{\lambda_T}{C_m \rho_b}$ или $k = \frac{\lambda_T}{C_v}$ (4); где C_m – удельная теплоемкость, ρ_b – плотность почвы, λ_T – коэффициент теплопроводности, C_v – объемная теплоемкость.

Эти уравнения используются для расчета одних теплофизических характеристик по известным другим. Как видно из этих уравнений, большое влияние на величины как числителя, так и знаменателя будет иметь влажность. Причем, как мы видели выше, на теплоемкость (в знаменателе) будет оказывать влияние изменение влажности как за счет процессов дренажа торфяных почв, так и процессов гистерезиса, которые снижают влажность. Вероятно, эти изменения во влажности окажут влияние и на теплопроводность (числитель). И если для процессов дренирования торфов известно довольно много, то в отношении влияния гистерезиса на уменьшение влажности, а вследствие и на значения теплоемкости и теплопроводности, соответственно, температуропроводности, как частного от деления неизвестно почти ничего. Безусловно, изучение направления процесса (увлажнения и иссушения) на температуропроводность должно составить одну из задач работы.

На расположение и форму основной теплофизической характеристики влияют свойства торфа. Как было указано выше, за счет влияния влажности на теплоемкость, причем как при увлажнении, так и при иссушении, возможны изменения и температуропроводности, т.е. имеет значение, будут ли происходить изменения в зависимости от процесса, который происходит, - увлажнение или иссушение. Такое изменение кривой называют гистерезисом. Большинство современных исследований направлены на выявление гистерезиса для кривой водоудерживания минеральных почв, в то время как данных по наличию или отсутствию гистерезиса для кривой температуропроводности на данный момент практически нет. Как известно, одна из наиболее вероятных причин гистерезиса - сложное поровое пространство. Структура порового пространства торфа значительно отличается от минеральных почв. Торф является макропористой системой. При заполнении его пор водой происходит значительное набухание, в то же время иссушение может привести к состоянию гидрофобности. При этом происходит «переукладка» частиц, и структура порового пространства изменяется. Для регулирования температурного режима необходимо знать, влияет ли это на положение кривой зависимости температуропроводности от объемной влажности и необходимо ли это учитывать при расчетах (Sorokina и др., 2020). Для торфоземов Яхромской долины такие данные были получены в данной работе.

Водоудерживающие характеристики торфа влияют на его термические свойства. Tarnawski и Leong (2012) сообщили, что различные тенденции, наблюдаемые между теплопроводностью и относительным содержанием воды, могут быть связаны с различием в удержании влаги в почве в пределах порового пространства, на которое влияют текстура почвы, содержание органического вещества и плотность (Tarnawski, Leong, 2012). В основном из-за изменений, вызванных водой, теплопроводность влажного торфа может быть до 15 раз больше, чем значения того же торфа в сухом виде (Dissanayaka и др., 2012). По сравнению с минеральной почвой при том же объемном

содержании воды, торфяная почва имеет более низкие значения теплопроводности и коэффициент температуропроводности. Иными словами, теплоемкость в торфе обычно выше, чем в минеральной почве из-за высокого содержания органических веществ и воды в торфе (Novak, Black, 1985). Системная и всесторонняя оценка термических свойств в различных условиях необходима для характеристики термических характеристик песчаных и торфяных почв (Ghanbarian, Daigle, 2016). Факторы, в целом влияющие на значения тепловых свойств грунта, можно разделить на две большие группы. Первая группа состоит из свойств, присущих твердой фазе почвы, включая текстуру почвы, минеральный состав и содержание органических веществ (Nikoosokhan и др., 2015). Органические материалы обычно имеют значение теплопроводности, составляющие одну десятую от значения теплопроводности минеральных материалов. Таким образом, содержание органических материалов влияет на общие значения теплопроводности почвы. По этой причине торф в относительно сухих условиях может также действовать как изолирующий материал, замедляющий теплопроводность. Вторая группа связана с пустотами, которыми можно управлять или управлять ими посредством управления почвой, и включает в себя содержание влаги в почве и плотность почвы (ρ_b) (Abu-Hamdeh, Reeder, 2000). Вода имеет значение теплопроводности в 25 раз больше, чем значение для воздуха, но меньше, чем значение, наблюдаемое для минералов почвы; следовательно, влажность существенно влияет на теплопроводность почвы. Для заданных значений влажности и плотности песчаные почвы обычно имеют более высокие значения теплопроводности, чем грунты с мелкими текстурами. Поскольку значение теплопроводности льда более чем в четыре раза больше, чем у воды (Penner, 1970), содержание льда, которое зависит от температуры почвы, изменяет теплопроводность почвы. Например, Ochsner и Baker (2008) сообщили, что для температур от -5°C до 0°C термические свойства почвы сильно зависели от температуры, изменяясь более чем на два порядка (Zhao, 2019).

Изменение температуры в почве является одной из важных характеристик для многих процессов, например, транспирации или потока в почву тепла, жизнедеятельности растений. Наибольшие колебания температуры, как правило, происходят в поверхностном горизонте. С глубиной колебания затухают. Для сельского хозяйства особенно актуально знать изменения температуры в течение длительного периода. Для этого необходимо проводить длительные полевые измерения температуры. Они помогут понять, в какие периоды начинается промерзание или оттаивание почвы.

Е.А.Дюкарев (Дюкарев, 2012) провел исследования хода колебания температуры торфяной почвы болота в Южной Тайге Западной Сибири. Было проведено длительное исследование - 62 месяца. Автором было выявлено два основных годовых периода - оттаивание и охлаждение. Первый связан с нагреванием и оттаиванием слоев, в которых была мерзлота. Вторым (обратным) - сезонное промерзание. Все слои прогревались до положительных температур. Как уже было отмечено, на колебания температуры влияют снежный покров, фазовые переходы вода-лед. Годовое колебание температуры было выявлено на всех глубинах (исследование проводилось на 8 глубинах с 5 до 80 см). Суточные колебания также были выявлены. На поверхности были более ярко выражены. Наиболее заметно колебание суточных температур весной, когда начинается прогревание почвы. Стоит отметить, что автором было выявлено отсутствие суточных колебаний на больших глубинах, глубже 40-80см. Таким образом, в торфяной почве присутствуют как суточные, так и годовые колебания температур.

Часть территорий, на которых располагаются торфяные почвы, в данный момент заболочены и не используются в сельском хозяйстве. Также встречаются почвы с вечной мерзлотой. В современных условиях наблюдается изменения климатических условий, связанных в том числе и с изменением теплового режима. В ряде исследований были проведены измерения теплопроводности для мерзлого торфа. Как уже было сказано, сухой торф является хорошим изолятором, но влажный проводит тепло лучше.

В настоящее время частая проблема, связанная с торфяными почвами, — это пирогенная и гидротермическая деградация. Торфяные пожары оказывают негативное влияние не только на саму сгораемую территорию, но и на прилегающую. В том числе, на людей, которые проживают на прилегающих территориях. Сильное задымление может вызывать проблемы со здоровьем, затруднять движение транспортных средств: передвижение автомобилей в условиях тумана, перелет самолетов. На природные ландшафты пожары также оказывают негативное влияние. В зависимости от мест возгорания воздействие отличается. При возгораниях осушенных торфяников часто идет выгорание торфа (Зайдельман, 2011), происходит глубокая деградация торфяной толщи. Вплоть до выхода на поверхность подстилающей породы. При этом негативное влияние происходит не только на человека, но и на биоту прилегающей территории. В связи с этим проблема торфяных пожаров, регулирование гидро и теплофизических свойств актуальна не только для вовлечения торфов в сельское хозяйство, но и для обеспечения безопасности («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2).

Таким образом, чтобы избежать торфяных пожаров и пирогенной деградации оптимальнее всего выбирать двухсторонние дренажные системы. Такие системы дадут двухсторонний эффект: в периоды затоплений помогут опускать уровень воды, а в жаркие и засушливые периоды, наоборот, поднимать («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2; Тяботов, Дылдин, 2014).

Изменения климата воздействуют на протекание внутрпочвенных процессов, почвенные функции в биосфере. Влияние глобальных изменений климата и локального антропогенного воздействия изучены еще недостаточно как в российской, так и в мировой науке. В связи с этим прежде всего возникают проблемы влияния температуры и влажности на продуктивность почв, их устойчивость и углеродный баланс торфяных почв, как основных интразональных почв с высоким содержанием органического вещества.

Учитывая, что в настоящее время торфяные почвы активно используются в сельском хозяйстве, определяют баланс углерода в приземном слое биосферы; фактор температуры для биологической деятельности зачастую оказывается лимитирующим (Sorokina и др., 2020). В настоящее время теплофизические свойства торфа мало изучены. Возможность контролировать и оптимизировать расчеты тепловые режимы торфяных почв будет иметь большое значение в сельском хозяйстве. В том числе это влияет на увеличение урожая, на определение какие культуры лучше выращивать в тех или иных условиях. Исходя из этого, была следующая поставлена задача:

- 3. Изучить возможность проявления гистерезиса для зависимости температуропроводности от влажности на основе взаимосвязи водных и тепловых свойств почв.*

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты исследования

Объектом исследования был выбран низинный торф долины р. Яхромы в пределах территории Дмитровского филиала Всероссийского НИИ мелиорированных земель – ДФ ВНИИМЗ. Поймы рек, как правило, представлены разнообразными видами залежей, отличающихся по своим свойствам. Несмотря на название «пойма реки Яхромы», вся территория поймы не затопливается, поэтому относительно именно этого объекта также часто употребляют название «долина реки Яхромы». Связано последнее более корректное название и с тем, что долина представляет собой геологический разлом, в котором и течет река Яхрома. В этом геологическом разломе происходило накопление разного рода осадков, он подтапливался намывными и склоновыми водами, формировались болотные условия с соответствующим торфообразованием. Однако в современной литературе нередко встречается не совсем научно корректный термин «Яхромская пойма», при употреблении которого авторы имеют в виду прежде всего географическое расположение долины, но не особенности её формирования.

Долина («пойма») реки Яхромы расположена в центральной части России в Верхневолжской низменности, на севере Московской области, в направлении с юго-востока на северо-запад. Она занимает котловину, образование которой происходило еще в доледниковый период в пределах Клинско-Дмитровской моренной гряды. Важно отметить, что согласно геологическим исследованиям, проведенным на территории центральной части поймы, образование торфа началось до формирования современного русла реки, так как слой торфа залегает под иловатыми речными отложениями. (Черноусенко, Судницын, 2019; «Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2).

Деятельность реки в процессе развития была неоднородной. В периоды активной аллювиальной деятельности были образованы илистые насосы, слой

которых тем больше, чем ближе расположение к реке; в отдаленных частях от русла речь идет о более тонких слоях ила. Также несколько раз происходила смена лесов на территории долины реки. Хвойные леса с осоковым ярусом сменялись лиственными с разнотравьем, затем снова хвойными. Таким образом, долина реки представляет собой систему переслойных отложений.

Долину, с точки зрения геологии, можно разделить на три основные части: притеррасная часть, центральная и прирусловая. В зависимости от рассматриваемого участка торфы отличаются по своему ботаническому составу и другим свойствам (Черноусенко, Судницын, 2019; «Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2; Рабинович и др., 2018). В настоящее время пойма вовлечена в активное сельскохозяйственное использование и разделена на 2 участка: стационар «Ближний» и стационар «Дальний». Изучение первого из этих стационаров началось еще в 1906 году с целью использования торфяного массива для сельскохозяйственного производства. Происходило изучение климата, торфяной мощности, уровня грунтовых вод. Все это было необходимо для дальнейшего осушения этих почв и вовлечения их в сельскохозяйственную деятельность. Все собранные данные позволили начать осушение долины. Осушение в основном проводилось силами рабочих - вручную вырубали кусты, прорывали каналы. Это позволило собирать первые урожаи в этой части долины. К наступлению 1941 года уже была освоена большая часть долины. С наступлением военных действий осушение было прервано и произошло новое заболачивание. После окончания войны осушение реки началось уже более активно. Теперь была вовлечена вся пойма, а не только территории стационара «Ближний». В работу по осушению была также вовлечена техника. В 1961-1965 годах была построена мелиоративная сеть для двух стационаров «Ближний» и «Дальний».

На формирование этих двух стационаров влияют разные природные факторы. Если речь идет о стационаре «Ближний», то это река Яхрома и напорные железисто-карбонатные воды. Река сформировала здесь

агроминеральные торфоземы. Другие виды торфяных почв содержат большое количество карбонатов и карбонатно-железистых отложений.

Территория стационара «Ближний» была осушена закрытой дренажной системой, которая в настоящее время функционирует плохо или не функционирует вообще. Большая часть второго участка, помимо 8-ого квартала, осушена частыми открытыми каналами. Восьмой квартал осушен экспериментальной системой дренажа, с глубиной закладки дрен от 80 до 150 см и расстоянием между ними от 15 до 40 м (Поздняков и др., 2014).

При правильном использовании все низинные торфа представляют собой весьма плодородные участки земли. В настоящее время оба стационара интенсивно используются в сельском хозяйстве с большой насыщенностью севооборотов пропашными культурами, с обильным внесением удобрений, необходимых для каждой культуры (Рабинович и др., 2018). До вовлечения данных торфяников в сельскохозяйственную деятельность было проведено их исследование и классификация. Согласно Скрынниковой И.Н. (1964) и Минкиной Ц.И. (1966, 1972), в пределах долины были выделены следующие почвы:

1. Торфяные окультуренные почвы, развитые на мощной древесной торфяной залежи.
2. Торфяные окультуренные почвы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа.
3. Торфяные окультуренные почвы с повышенным содержанием карбонатов кальция, развитые на мощной залежи осокового торфа, подстилаемого ниже известью.
4. Торфяные неокультуренные почвы, развитые на осоково- гипновых и гипновых торфах.
5. Торфяные неокультуренные почвы, развитые на залежи осокового торфа, подстилаем известью.

6. Торфяные оглеенные окультуренные почвы, развитые на древесно-травяном, переходящем в осоковый торф, подстилаемые минеральным аллювием на глубине до 1 м.

7. Торфянисто-глеевые аллювиальные окультуренные почвы, развитые на аллювиальной супеси, переходящей в песок.

8. Торфянисто-глеевые неокультуренные почвы, развитые на залежи осокового торфа, подстилаемого оглеенным песком.

9. Торфянисто-глеевые аллювиальные неокультуренные почвы, развитые на аллювиальной супеси, переходящей в песок.

10. Торфянисто-глеевые аллювиальные окультуренные почвы, развитые на осоковом торфе и минеральных аллювиальных отложениях, подстилаемых древесными и древесно-травяными торфами.

11. Торфянисто-глеевые аллювиальные неокультуренные почвы, развитые на осоковом торфе и минеральных аллювиальных отложениях, подстилаемых древесными или древесно-травяными торфами.

Среди минеральных почв выделяли следующие разновидности:

1. Дерновые аллювиальные глеевые среднесуглинистые и легкосуглинистые окультуренные почвы, развитые на аллювиальных отложениях, подстилаемых торфом.

2. Дерновые аллювиальные оглеенные среднесуглинистые окультуренные почвы, развитые на среднем аллювиальном суглинке, подстилаемом торфом.

3. Дерновые аллювиальные суглинистые окультуренные почвы, развитые на суглинках, подстилаемых торфом и ниже песком.

4. Дерновые» («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2 стр. 130-131)

В настоящее время эти торфяники трансформированы в торфоземы, окультурены и используются в сельском хозяйстве. В то же время, притеррасная

часть поймы
начинает
зарастать лесом
(точка 5, рисунок
1), начинается
процесс
вторичного
заболачивания. В
этой части
располагаются
гипновые торфа,
которые более
сложны в
осушении и
заболачиваются
напорными

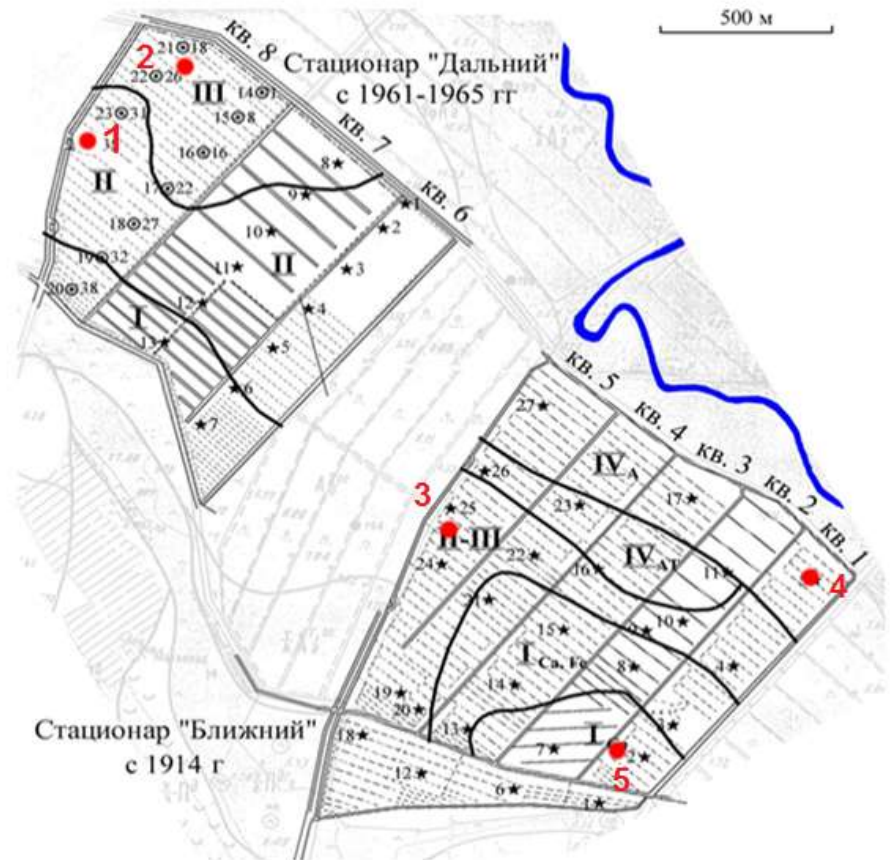


Рисунок 1 – Схема расположения стационаров "Ближний" и "Дальний" (по Позднякову и др., 2014)

грунтовыми водами. Согласно литературным источникам, данные торфа имеют низкую степень разложения. Их образование происходило на территории древних озер, и они состоят из остатков мхов. В отличие от древесных торфов, они наименее плодородны, с низким содержанием азота. В связи с этим стоит отметить, что в зависимости от состава торфяных почв к ним следует применять особые подходы в осушении, максимально учитывать неоднородность почвенного покрова. Одним из наиболее благоприятных вариантов использования гипновых торфов — это выращивание травяных культур, например, бобовых, которые обогащают почву азотом.

На участках, которые располагаются в непосредственной близости к реке, - прирусловая часть поймы, торфообразование прекратилось в

результате образования илистого насоса, что связано с непосредственной активностью реки. Также повлиял интенсивный сток, который был вызван сведением лесов. («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2). На этом участке в результате образовались агроминеральные торфоземы. Они представляют собой торфяно-переслойные почвы. Слои торфа чередуются с аллювиальными легкосуглинистыми отложениями. Данные торфа расположены только на участке «Ближний», в непосредственной близости к руслу реки. В рамках диссертации были выбраны данные торфа для агрофизического изучения - точка 4 (рисунок 1). Одной из их отличительных особенностей является более глубокое залегание грунтовых вод.

Центральную часть поймы занимают древесные торфа, развитые на древесно-осоковом торфе. В этой части нами было выбрано 2 точки: точка 1 и точка 3 (рисунок 1). Отличием данных торфов от других является наличие травяного торфа, который обладает большой влагоемкостью. О сильном увлажнении также свидетельствует наличие разланных форм железа в профиле. Вследствие чего их осушение требует дополнительных сил и затрат. Севообороты, с чередованием пропашных и культур сплошного сева, помогут сохранить естественное плодородие данных торфов.

Еще одна точка в центральной части поймы - точка 2; торфоземы, развитые на мощном древесном торфе (рисунок 1). Все древесные торфа считаются наиболее пригодными для использования в сельском хозяйстве, они являются наиболее плодородными и более легко осушаемыми, богаты азотом. Как было сказано ранее, в процессе формирования современной долины реки происходила смена лесов, поэтому древесные торфа здесь представлены в основном остатками древесных пород. Их образование происходило без избыточного увлажнения. Зольность, как правило, находится в интервале 15 – 30%, хотя в пахотном горизонте может быть выше 30%. Присутствие в составе золы глинистых и песчаных частиц благоприятно влияет на тепловой и водный режим. Правильная система земледелия, внесение калийных и фосфорных

удобрений поможет поддерживать их плодородие на высоком уровне, что будет приносить высокий урожай (Поздняков и др., 2014).

Торфа пойменных частей рек хорошо использовать для изучения перехода в торфоземы торфяных почв. Торф выступает в роли органогенной материнской породы, на нем формируются эутрофные торфяные почвы. В результате мелиорации и использования в сельском хозяйстве торфа переходят в торфоземы.

В рамках диссертации мы рассмотрели свойства торфоземов различных по ботаническому составу, плотности, зольности и степени разложения, особенности их теплофизических и гидрофизических свойств.

Образование торфяных залежей на территории долины реки Яхрома происходило в сложных гидрологических условиях («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2). Одно из основных условий — это мощные напорные железисто-карбонатные воды, выклинивающиеся в притеррасной части поймы. Именно эти воды в большей степени являются одной из основных причин заболачивания, если говорить о притеррасной части долины реки Яхрома. Торфа представленные в этой части долины являются гипновыми и осоково-гипновыми. Они образовывались в условиях высокой влажности и относятся к трудно осушаемым. Также данные торфа легче и больше других подвержены деградации. Нами была выбрана точка на данном участке, на рисунке точка 5. Она находилась в лесу под естественной растительностью, на участке, не вовлеченном в сельскохозяйственную деятельность. Согласно архивным данным, гипновые торфа также характеризуются меньшей зольностью и плотностью сложения.

К настоящему моменту собрано большое количество литературных данных по изменениям свойств торфяных почв Яхромской долины с вовлечением ее в сельское хозяйство. Как известно, в первые годы после мелиорации происходят самые заметные изменения в усадке торфа от 3 до 8 см в год за первые 5-7 лет («Природообустройство полесья», 2019,

коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2). Поэтому очень важно правильно осушать и снижать деградационные процессы, тем самым увеличивая срок использования и плодородие торфяных почв. Согласно А.И.Позднякову (2014), к 90-м годам прошлого века мощность окультуренного слоя составляла уже почти 40 см, что в два раза больше по сравнению с 20 см в 60-е годы 20 века. С наиболее активным использованием также заметно увеличивается зольность и степень разложения торфа. Причем, чем дольше используется участок в сельском хозяйстве, тем сильнее изменяется зольность в сторону увеличения. Соответственно, с глубиной, где наблюдается уменьшение антропогенного влияния, зольность уменьшается. Аналогичная зависимость характерна и для степени разложения. При осушении торфяников происходит минерализация и трансформация органического вещества. При этом степень разложения торфяных почв увеличивается. Стоит отметить, что самые легкоподдающиеся деградации и изменениям - это гипновые торфа. При их использовании стоит особенно аккуратно подбирать способы осушения и севообороты, чтобы избежать быстрой деградации и изменений. Закономерно, что при активном использовании снижается уровень органического вещества и углерода. Причем, на участке стационара «Ближний», который находится в эксплуатации уже более 100 лет, изменения более значительные, нежели для стационара «Дальний», который активно используется порядка 60 лет.

Если для органического вещества, углерода, степени разложения и зольности изменения происходят с увеличением срока использования, то, например, плотность изменяется активнее всего в первое время после осушения. Это связано со снижением воздействия грунтовых вод. Далее изменение плотности происходит медленнее.

Таким образом, мы видим, что долина реки Яхрома представляет собой участок с разнообразными торфоземами, которые отличаются не только по своим свойствам, таким как плотность, зольность и ботанический состав, но и процессами образования: влиянием ледника, реки, изменением климата и

растительности с течением времени. Нами были выбраны для исследования все основные торфоземы, которые представлены в пойме: торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа; торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи; торфоземы агроминеральные; торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами.

2.2. Методы исследования

2.2.1. Методы исследования основных физических свойств

Физические свойства исследуемого объекта были определены традиционными методами физики почв:

1. Плотность почвы рассчитывалась как соотношение массы абсолютно сухой почвы к объему цилиндра, занятого почвой;
2. Влажность определяли термостатно-весовым методом.
3. Зольность типовым методом. Первым этапом проводится подготовка тиглей к проведению эксперимента: их прокаливают при температуре 800 градусов Цельсия для доведения до постоянной массы. Просеянную через сито с диаметром отверстий 1 мм навеску почвы помещают в 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

2.2.2. Метод определения основной гидрофизической характеристики

Для получения кривой ОГХ в области r_F от 1 до 2,9 использовали метод капилляриметров в зондовом варианте («Теория и методы физики почв», под ред. Шеина Е.В. и Карпачевского Л.О., 2007). Несмотря на то, что он позволяет измерить давление почвенной влаги до 80-90 кПа (по модулю), для

крупнопористых сред этого вполне достаточно для удаления большего количества влаги, порядка 80-90% от общей вместимости.

Основой метода является установление равновесия, которое происходит между двумя жидкими фазами: почвенная вода и вода в контрольном сосуде, на котором фиксируется внешнее давление. В ходе эксперимента снижается давление и ожидается установление равновесия между установленным давлением и капиллярно-сорбционным давлением почвенной влаги. После этого внешнее давление снова понижается для получения следующей пары значений «давление влаги-влажность».

В лабораторных условиях используется капилляриметрическая установка в зондовом варианте («Теории и методы физики почв», под ред. Шеина Е.В. и Карпачевского Л.О., 2007). В колонку помещался почвенный образец, в который, в свою очередь, помещался зонд в виде бактериального керамического фильтра, соединенного с бюреткой и вакуумметром. Вакуумметр служит для измерения в системе отрицательного давления в процессе исследования. Через буферную емкость его подсоединяют к насосу. Исследование одновременно проводилось в 10 почвенных образцах.

Эксперимент проходил в три этапа: подготовка установки и непосредственное определение капиллярно-сорбционного давления.

На первом этапе керамические фильтры помещали в стаканы с водой. В системе создавалось разрежение, и вода из стакана начинала подниматься по бюреткам вверх. Если появлялись большие пузырьки воздуха, это говорило о том, что данный фильтр не пригоден для эксперимента. Его заменяли новым и повторяли процедуру, пока все фильтры не будут удовлетворять необходимым требованиям.

На втором этапе зонд располагают строго по центру цилиндра, в который насыпают образец почвы. Цилиндр полностью заполняют почвой. Учет массы засыпаемой почвы проводился в конце эксперимента. Затем почвенный образец увлажняли до влажности, близкой к полной влагоемкости. Для этого с помощью шприца заполняли фильтр и половину бюретки, для

стекания избытка влаги цилиндр с почвой помещали в стеклянный стакан. Насыщение происходило в течение 24 часов.

На третьем этапе эксперимента цилиндр извлекают из стакана и устанавливают нулевой уровень воды в бюретки. Путем создания разрежения вакуумным насосом в системе уравнивается давление столба воды. Затем создавалось первое разрежение, равное 29,9 см. водн. ст. и велось наблюдение за вытеканием воды из почвы в бюретку до прекращения передвижения воды (образец оставляли на сутки – 24ч), которое свидетельствует об установлении равновесия потенциала почвенной влаги и чистой воды. Высота столба в бюретке численно равна гравитационному давлению, поэтому использовалась при дальнейших расчётах.

После прекращения изменений показаний по бюретке разрежение увеличивалось и вновь велось наблюдение до прекращения вытекания воды из почвенного образца.

Аналогичным образом было сделано 6 разрежений: 29,9; 59,8; 100,6; 299,1; 499; 651,2 см водного столба. После этого, не сбрасывая разрежения, эксперимент был продолжен в обратном направлении. Заданные разрежения уменьшались, при этом фиксировалось количество воды, вытекшее из бюретки. Таким образом, протекал эксперимент по определению гистерезиса ОГХ в изучаемых торфоземах.

В конце эксперимента, не сбрасывая разрежение в системе, аккуратно выталкивали керамический зонд из металлического цилиндра, а почву помещали в предварительно взвешенные алюминиевые бюксы.

Почву, помещенную в бюксы, взвешивали на технических весах и высушивали 6 часов при температуре 105°C до постоянной массы для определения влажности исследуемых образцов. Для расчета влажности, соответствующей предыдущим уровням разряжения, использовался метод обратного пересчета с учетом объема вытекшей из почвы воды.

2.2.3 Определение основной теплофизической характеристики почв и ее гистерезиса

Основная теплофизическая характеристика (Архангельская, 2004) представляет собой график зависимости коэффициента температуропроводности от влажности. Для минеральных почв имеет куполообразную форму. Как было сказано ранее, температуропроводность — это частное от деления теплопроводности на теплоемкость. При этом можно и важно отметить, что при увлажнении почва будет прогреваться быстрее, чем при иссушении. Если мы обратимся к уравнению теплоемкости для органогенных почв (Шеин, 2005), то можно увидеть, что оно отличается от минеральных:

$$C_v = 0.48f_m + 0.6f_{org} + f_w \quad (5),$$

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 C_{vw} при иссушении будет больше, чем при увлажнении за счет различия влажности (при увлажнении меньше, чем при иссушении). Следовательно, 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. Однако в ходе проведенных экспериментов различий между значениями температуропроводности для обоих процессов не выявлено. По всей видимости, гистерезис ОГХ также будет влиять и на теплопроводность, которая должна снизиться в необходимое число раз при увлажнении, чтобы температуропроводность не изменилась в зависимости от направления процесса.

Для изучения этого процесса были проведены лабораторные исследования температуропроводности методом Кондратьева (Теории и методы физики почв: коллективная монография, 2007; Arkhangel'skaya и др., 2015). Метод основан на теории регулярного режима.

Определение проводилось следующим образом: в металлический цилиндр засыпали почвенный образец. Предварительно цилиндр взвешивают, выписывают его диаметр. Высота почвы фиксируется для дальнейшего вычисления объема. Образец естественной влажности насыщали над кристаллизатором в течение 3-4 недель, далее проводили измерения. В предварительно взвешенный цилиндр помещали термопару так, чтобы она находилась в центре цилиндра, сам цилиндр помещают в специальную рамку, сверху и снизу зажимая его, защищая от поступления воды. В предварительно нагретый термостат, помещают цилиндр. Разница температур между цилиндром и термостатом составляла, как правило, около 10 градусов. Согласно теории регулярного режима при помещении тела в среду с повышенной температурой оно будет нагреваться. Нагревание вначале будет идти хаотично, затем процесс пойдет линейно (Теории и методы физики почв: коллективная монография под ред. Е.В.Шеина и Л.О. Карпачевского, 2007). Изменения температуры фиксировали термодатчики РС-4, настроенные записывать температуру каждые 30 секунд. Измерения проводились до тех пор, пока показания температуры на приборе не достигали постоянных значений. В зависимости от влажности измеряемого образца — это порядка 20-35 минут.

После каждого измерения цилиндр с почвой ставили на кристаллизатор для уменьшения массы. После падения массы колонки измерение повторялось. Таким образом, мы получали кривую зависимости температуропроводности от влажности на стадии иссушения. В ходе измерений мы доходили до точки, когда не происходило длительного изменения массы колонки. Стоит отметить, что при иссушении образца наблюдалась значительная усадка торфа. Высота почвы в цилиндре падала с 9 до 6-7см. В результате был получен массив данных изменения температуры с течением времени.

В ходе эксперимента были определены две кривые температуропроводности: на стадии иссушения и увлажнения. Для получения

кривой увлажнения образец после иссушения ставили на кристаллизатор с водой и проводили его насыщение. Масса колонки начинала увеличиваться. При изменении массы снова проводилось измерение температуропроводности, но уже на стадии увлажнения. Время проведения измерений определялось по изменению массы. Целью эксперимента было выявить наличие или отсутствие гистерезиса кривой температуропроводности. В процессе насыщения также определялась температуропроводность. Насыщение проводилось до достижения колонкой массы, с которой мы начинали свой эксперимент. В конце эксперимента весь образец высушивался при 105 градусах для определения влажности. Рассчитывалось значение температуропроводности. Таким образом, в результате мы получаем пары значений: «температуропроводность-влажность» для построения двух кривых - на стадии увлажнения и иссушения.

2.2.4. Томографическая съемка образцов

Исследовательская работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 19-29-05112). Эта часть работы была выполнена с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Торфоземы являются крупнопористой системой со сложной структурой порового пространства (Rezanezhad и др., 2016). Его строение играет важную роль при изучении гистерезиса тепло- и гидрофизических свойств. С помощью данного метода нами было изучено поровое пространство исследованных торфов.

Съемка производилась на монолитных образцах, отобранных в полевых условиях. Отбор образцов производился в шприцы, после чего происходила съемка. Первое исследование проводилось на образцах с полевой влажностью. Далее каждый монолит насыщался, после чего проводилось исследование насыщенных образцов.

В настоящее время технологии позволяют рассмотреть и исследовать макро-, микро- и даже наноуровни. Для сравнения, в 1980-х годах такой

возможности не было, исследовались только макропоры. (Абросимов и др., 2021; Crestana, 1985; Petrovic et al, 1982). Сейчас разработан ряд ПО, позволяющий математически обрабатывать полученные данные (Абросимов и др., 2021).

Томографическое исследование образцов торфогрунтов выполнено в Почвенном институте им. В.В. Докучаева на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172G (рисунок 2).

Набухание горизонта с большим содержанием органики было отмечено после недели полного насыщения.



Рисунок 2 – Рентгеновский микротомограф SkyScan 1172G

Образцы были специально подготовлены к исследованию. Первичный отбор микромонолитов проводился в полевых условиях в медицинские шприцы. Далее он был упакован с помощью пленки и скотча; до проведения эксперимента объект находился в холодильнике. Перед началом эксперимента образцы упакованы в рентген-прозрачные цилиндры диаметром (ПВХ-стержень с внутренним диаметром 3 мм), упаковка герметизирована с целью исключить высыхание образца в первые несколько недель после упаковки. При исследованиях монолиты могут отличаться по размерам: 5-20 см или 1-3 см диаметром. Изучая первые, исследуют различные изменения порового пространства, в том числе деградацию, корневые системы при меньшем диаметре монолитов, разрешение, при котором проводится исследование лежит в диапазоне 1-30 мкм (Абросимов и др., 2021). Томографическая съемка

проводилась с разрешением 8 мкм и по настройкам, ранее применявшимся в исследовании микроструктуры лёссовидных суглинков при аналогичном разрешении (Gerke et al., 2012; Gorbov et al., 2016, Шеин и др., 2016). Параметры томографической съемки образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1- Параметры микротомографической съемки

| Параметры томографической съемки | Настройки реконструкции данных |
|--------------------------------------|---|
| [System] | [Reconstruction] |
| Scanner=Skyscan1172 | Reconstruction Program=NRecon |
| Source Type=Hamamatsu 100/250 | Program Version=Version: 1.7.4.6 |
| Camera=SHT 11Mp camera | Result File Type=BMP |
| Number of Files= 500 | Result File Header Length (bytes)=1134 |
| Source Voltage (kV)= 70 | Result Image Width (pixels)=2000 |
| Source Current (uA)= 129 | Result Image Height (pixels)=2000 |
| Number of Rows= 1332 | Pixel Size (um)=7.91772 |
| Number of Columns= 2000 | Reconstruction Angular Range (deg)=199.60 |
| Image Pixel Size (um)= 7.92 | Use 180+=OFF |
| Object to Source (mm)=94.630 | Angular Step (deg)=0.4000 |
| Camera to Source (mm)=215.308 | Smoothing=3 |
| Vertical Object Position (mm)=26.473 | Smoothing kernel=2 (Gaussian) |
| Filter=Al 0.5 mm | Ring Artifact Correction=20 |
| Image Format=TIFF | Object Bigger than FOV=ON |
| Exposure (ms)= 600 | Threshold for defect pixel mask (%) =3 |
| Rotation Step (deg)=0.400 | Beam Hardening Correction (%) =0 |
| Frame Averaging=ON (3) | Minimum for CS to Image |
| Random Movement=ON (10) | Conversion=0.004578 |
| Use 360 Rotation=NO | Maximum for CS to Image |
| | Conversion=0.045777 |

Томографические срезы обработаны и проанализированы при помощи следующего программного обеспечения (Bruker SkyScan NRecon User Manual, 2016):

Data Viewer – подготовка и генерация разверток томографических срезов под нужным углом сечения;

CTvox – генерация фрагмента объемной структуры образца: твердой фазы или порового пространства, а также объемных карт структурных размерностей обеих фаз. (SkyScan CTvox Quick Start Guide, 2014);

CTan – математическая обработка и расчеты объемных морфометрических показателей внутренней структуры для рентген-контрастных фаз. Программа позволяет получать значения порового

пространства образца в мм³ или в процентах от общего объема образца. К морфометрическим параметрам относятся (на примере одной рентген-контрастной фазы): объем, площадь поверхности объекта, пористость (общая, открытая и закрытая), количество частиц или структурных отдельностей, количество контактов между связанными частицами или структурными отдельностями (SkyScan Morphometric parameters measured by Skyscan CTanalyser software, User Guide, 2017; SkyScan Desktop X-ray Microtomograph Instruction Manual, 2005). Применение инструментов Structure separation / thickness позволяет сделать объемное картирование двух фаз одновременно – порового пространства и твердой фазы.

Алгоритм работы кратко можно описать так:

- Система восстанавливает объемную структуру на основе загруженного стека томографических данных.
- После бинаризации (разделения на поры и твердую фазу), оператором выбирается объект анализа.
- Система находит все объемные объекты и строит их «скелет» (центральную ось, равноудаленную от краев) толщиной в 1 пиксель.
- Пространство внутри объекта заполняется сферами разного диаметра с центром на линии «скелета», а краем до границы объекта. По принципу «1 воксель скелета - 1 сфера». Поэтому вся модель выглядит несколько сглаженной без острых краев.

Модель сохраняется в виде стека данных (изображения в серых тонах), который потом можно открыть в STvox, и там же настроить цвета в зависимости от размерной шкалы.

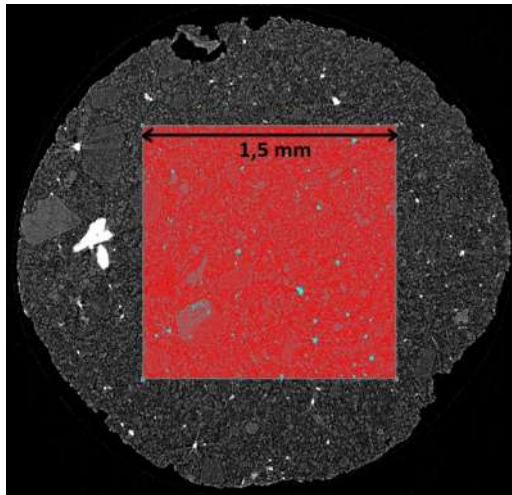


Рисунок 3 – Горизонтальный срез образца. Красным цветом обозначена зона расчетов морфометрических параметров и объемного картирования.

Область расчетов выбрана как куб со стороной в 1,5мм в центре отснятого цилиндрического сегмента образца. Такая форма выбрана с целью исключить «краевой эффект» сборки объемной структуры и для удобства расчетов (рисунок 3).

Расчеты делались по кубическому объему (1 см^3), вписанному внутрь структуры образца. Границы зоны расчетов до и после полного насыщения совпадают.

Метод компьютерной томографии удобен тем, что в результате не происходит повреждения образца. Благодаря этому один образец можно исследовать при различных значениях влажности, что и было сделано в данной работе. Было получено как изменяется поровое пространство при увлажнении (Romanenko и др., 2016; Shein и др., 2016).

Для выявления строения порового пространства, а также его изменения после заполнения пор водой, в данной работе была поставлена задача:

4 Методом компьютерной томографии изучить изменение структуры порового пространства монолитов торфяных почв разного генезиса при увлажнении.

2.2.5 Определение краевого угла смачивания

В ходе лабораторных исследований мы определяли зависимость угла смачивания от влажности. Для достижения различной влажности образцы проходили пробоподготовку. Торфозем был высушен до воздушно-сухого состояния, пока не было достигнуто равновесие в состоянии влажности. Далее образец просеивали через сито 0,25мм. Часть почвы массой 1-3 грамма помещали в бюксы, взвешивали на аналитических весах и ставили в эксикаторы, на дне которых располагаются различные насыщенные соли. Измерение проводилось в трех повторностях. Метод основан на том, что в закрытых изотермических условиях химический потенциал всех компонентов одинаков (Вадюнина, Корчагина, 1986). Были использованы следующие соли:

| Соль | K ₂ SO ₄ | KCl | Ca(NO ₃) ₂ *6H ₂ O | MgCl ₂ *6H ₂ O | LiCl |
|------------------|--------------------------------|------|--|--------------------------------------|------|
| P/P ₀ | 0,98 | 0,86 | 0,55 | 0,332 | 0,15 |

Образцы доводились до постоянной массы, путем проведения промежуточных взвешиваний в течение 2 месяцев. После этого для каждого образца определяли угол смачивания на приборе dsa100, kruss и соответствующая влажность. Значение pF соответствующее p/p_0 вычисляли по формуле (6):

$$pF = 6,502 + \log_{10}(2 - \log_{10} H), \text{ где } H - \text{ относительная влажность воздуха.}$$

Таким образом были получены значения угла смачивания, соответствующее ему значение влажность, p/p_0 и pF .

Для определения угла смачивания производилась дополнительная пробоподготовка образца. На специальное стекло наклеивается липкая бумага. Из каждого бюкса на нее насыпается почва и помещается под второе стекло, сверху придавливая грузом. Образец выдерживается в течение 60 секунд и далее процедура повторяется снова. После этого лишняя почва, которая не «прилипла» убирается и образец помещается в прибор, где проводится непосредственное измерение угла смачивания.

Устройство прибора DSA 100.

Прибор состоит из двух частей: часть, в которой производятся измерения и компьютер. На компьютер уставлено специальное ПО для работы с прибором. В нем происходит его программирование для работы. На столике расположено стекло с почвой. В приборе находится емкость с жидкостью, из которой через специальную иглу на прибор подается капля. Процесс падения капли фиксируется с помощью, установленных в приборе камер. Капля «садится» на почвенный образец. После этого просматривая видео с падением, мы выбираем первый четкий кадр с каплей и с помощью программы прибор высчитывает угол между почвой и каплей воды на почве. Для каждого образца было сделано 6 повторностей и рассчитано среднее значение.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ²

3.1 Основные свойства торфоземов Яхромской долины

3.1.1 Зольность, степень разложения и угол смачивания торфоземов

В ходе работы были исследованы основные свойства характерные для торфоземов, такие плотность, зольность и степень разложения. Данные представлены в таблице 2.

Как упоминалось ранее 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 двух точек на первом стационаре близка по значениям на двух изучаемых глубинах. Также с глубиной мы можем наблюдать незначительное уменьшение зольности на 3-4%. Это можно объяснить минерализацией органического вещества в верхних горизонтах. При этом, в верхних слоях почвы наблюдается накопление железа, что также оказывает непосредственное влияние на величины зольности.

Таблица 2 – Степень разложения и зольность торфоземов Яхромской долины. (Примечание: н.о. - не определяли)

² В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы автора, опубликованные изданиях, входящих в базы RSCI, Web of Science и/или Scopus:

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.

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

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

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

| Название почвы | Глубина отбора образца | Зольность, % | Степень разложения, % |
|---|------------------------|--------------|-----------------------|
| торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа (стационар Дальний) | 5-15 см | 24,8 | 81,6 |
| | 25-40 см | 20,1 | 69,5 |
| торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи | 5-15 см | 24,81 | 83 |
| | 25-40 см | 21,52 | 81,3 |
| торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа (стационар Ближний) | 5-15 см | 30,47 | 87,3 |
| | 25-40 см | 27,82 | 85,7 |
| торфоземы агроминеральные | 5-15 см | 23,25 | н.о. |
| | 25-40 см | 20,23 | 79,8 |
| торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами | 5-15 см | 16,22 | 63,2 |
| | 25-40 см | 15,99 | 61 |

Наибольшее значение зольности соответствует торфоземам древесным, развитым на древесном торфе и составляет 30 и 27% для глубин 5-15 и 25-40см соответственно. В то время как гипновые торфоземы имеют наименьшее значение зольности - 16% для двух выбранных глубин. Такое отличие от остальных изучаемых почв вызвано тем, что они в настоящее время не вовлечены в севообороты.

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 (рисунки 4,5).

Закономерно, значения зольности возрастают с течением времени в среднем в 1.2-1.5 раза. Однако, для гипсовых торфоземов мы наблюдаем обратную картину. Зольность гипсовых уменьшается. Схожие результаты были получены 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 и дренаж на нем разрушен. Во время отбора образцов данная территория была занята лесной растительностью.

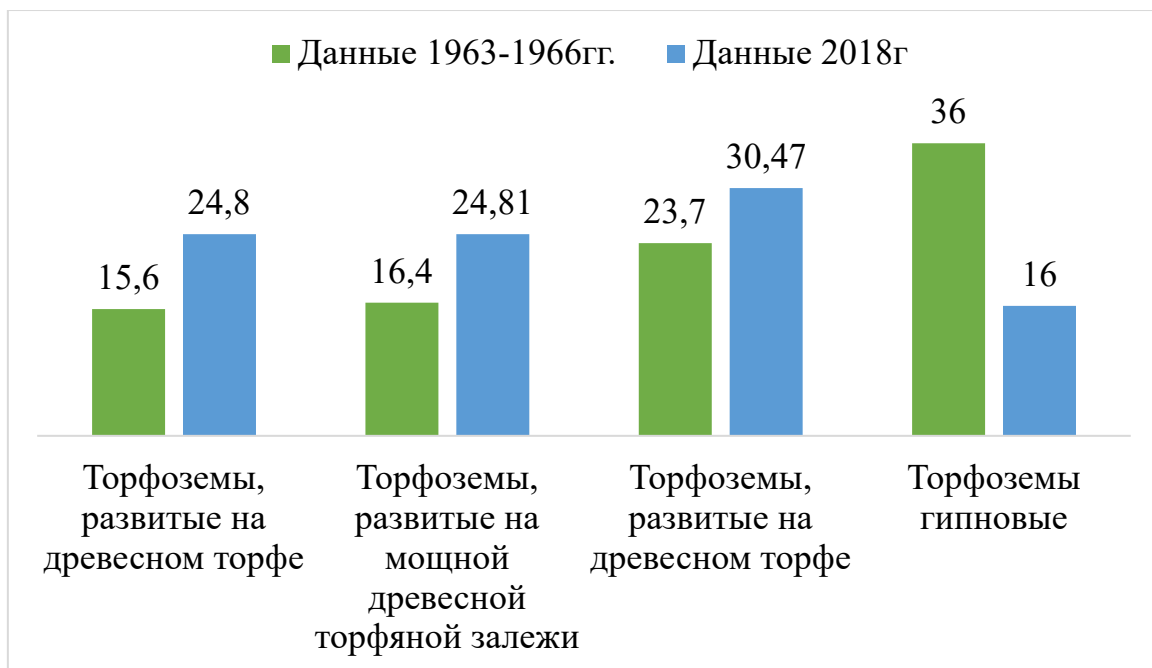


Рисунок 4 – Сравнение данных по зольности 1963-1966гг (по Минкиной, 1972) с данными 2018г.

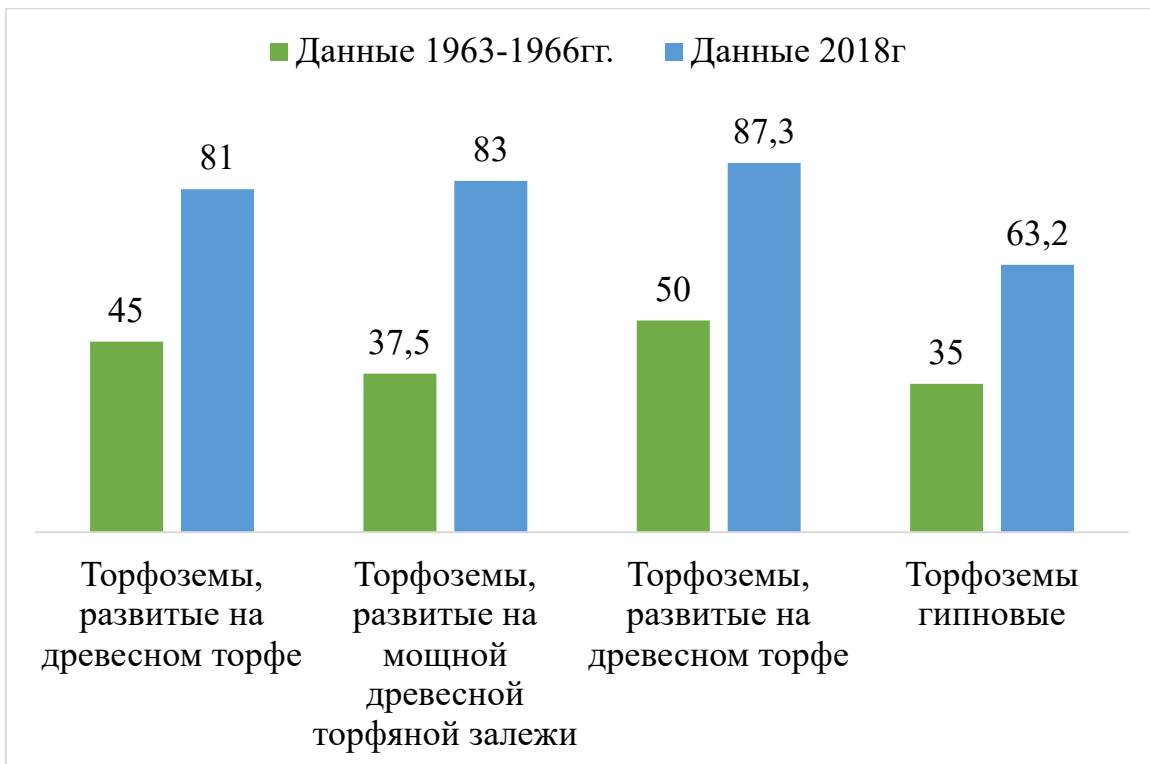


Рисунок 5 – Сравнение данных по степени разложения 1963-1966гг (по Минкиной, 1972) с данными 2018г.

При сравнении данных по степени разложения, 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, а значит значения влажности в них становятся ниже, что приводит к ускорению темпов разложения. Во-вторых, данные торфа активно используются в сельском хозяйстве.

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

Смачиваемость торфоземов является одной из важнейших современных проблем. Как известно, торф может находиться в двух состояниях: гидрофильном и гидрофобном. Одна часть практического исследования была посвящена определению коэффициента угла смачивания.

Вследствие методических преград определить угол смачивания для широкого диапазона влажностей не удалось. Определения захватили область влажностей, относящуюся к гигроскопической влажности от 2 до 15%. Для более высоких влажностей требуется разработка специальной методики, специальных методических подходов. Полученные результаты для указанной области влажностей представлены в Приложении 1.

3.1.2 Кривая водоудерживания торфоземов Яхромской долины

Одним из проведенных экспериментов было определение основной гидрофизической характеристики торфоземов и ее зависимости от их основных свойств. Ранее нами были рассмотрены основные свойства, влияющие на ее положение у минеральных почв. У органогенных почв эти свойства, вероятно, будут отличаться (Черноусенко и др., 2019).

Результаты определения кривой ОГХ представлены в виде графиков в координатах « r_f -объемная влажность», как в гидрофизике почв и положено представлять эту зависимость (Полужтков, Терлеев, 2005; Шеин, 2010).

Имеются данные о температурной зависимости для торфа, а также зависимости влажности от плотности торфа, которые указывают на существенное влияние плотности торфа на его влажность (Выржиковский, Кузьмичев, 1968).

Для полновесной оценки водоудерживания торфа необходимо экспериментально получить ОГХ. В настоящее время в основном ОГХ получают 2-мя путями: экспериментально, либо путем расчетов по педотрансферным функциям на основании зависимости ОГХ от базовых свойств почв, таких как гранулометрический состав, плотность, содержание органического вещества и др. (Шеин, 2010 и др.). Однако для органогенных почв пока неизвестны педотрансферные функции. В связи с этим, экспериментальное получение ОГХ составляло одну из основных задач работы.

На рисунках 6, 7 представлены ОГХ для разных слоев и торфоземов разного генезиса. Графики представляют собой классическую s-образную форму кривой. Более низким значениям рF соответствуют большие значения влажности. Торфоземы отличаются большим водоудерживанием, нежели минеральные почвы. В то же время левее остальных лежит график агроминеральных торфоземов, которые обладают наименьшим водоудерживанием. Самая правая точка графика, то есть с наибольшим водоудерживанием - торфоземы на разнотравном гипновом и гипновом торфе (рисунок 6, 7). Все кривые имеют схожий вид и сгущенное расположение.

Одна из характерных точек перегиба минеральных почв — это давление барботирования. Она обусловлена наиболее ярко выраженными капиллярными силами, для которых явление «входа воздуха» закономерно. Получившиеся кривые гораздо более плавные, точка перегиба не выражена, что можно объяснить незначительным количеством жесткостенных капилляров. Наибольшее достигнутое значение влажности у торфоземов гипновых. При значении плотности $0,17 \text{ г/см}^3$ максимальная объемная влажность составила 76%. Стоит отметить, что для давления рF равному 2,89 соответствует наименьшая объемная влажность 31,54% 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%. При этом, для глубины 25-40 см кривые ОГХ имеют более плавный внешний вид. Точка перегиба наименее выражена. Правее всех расположены торфоземы древесные, подстилаемые травяным и осоковым торфом. Самая левая кривая соответствует торфоземам древесным.

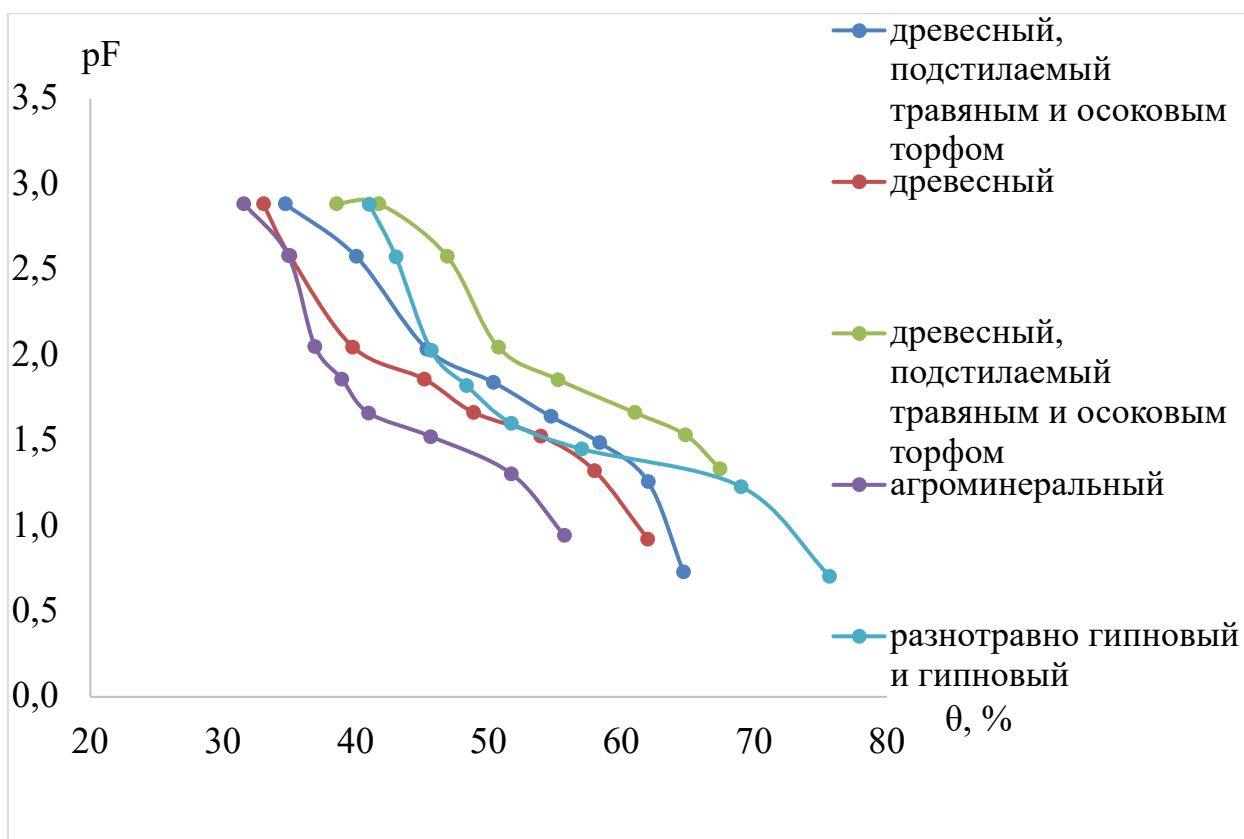


Рисунок 6 – Основная гидрофизическая характеристика торфоземов различного ботанического состава для глубины 5-15 см

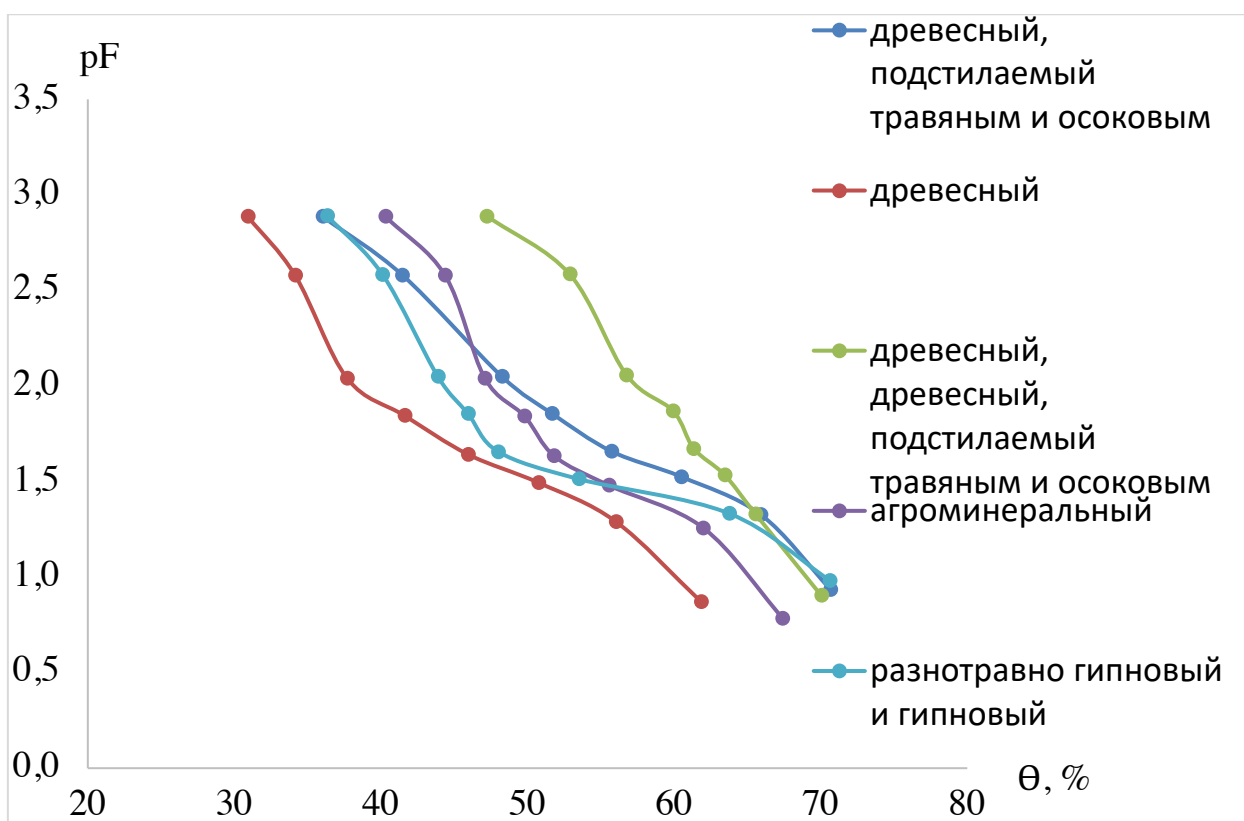


Рисунок 7 – Основная гидрофизическая характеристика торфоземов различного ботанического состава для глубины 25-40 см

Водоудерживающая способность торфоземов низкая, т.е. для давлений влаги ниже 50-100 см водного стола (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 (Шеин и др., 2018). Заметное увеличение влажности начинается с pF равного 2. В этой точке происходит перегиб прямой, она становится более плавной и значение влажности начинает увеличиваться более резко.

3.1.3 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 теплопроводности (k , $см^2/ч$) от объемной влажности (%)) для всех изучаемых торфоземов. На рисунке 8 представлены кривые для глубины 5-15 см.

При сравнении значений теплопроводности с минеральными почвами мы наблюдаем ее уменьшение. Так для торфоземов результаты эксперимента лежат в диапазоне в диапазоне 2,1-4,5 $см^2/ч$. В то время как для минеральных почв значения могут достигать до 20-30 $см^2/ч$ (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 от всех имеют торфоземы агроминеральные и гипновые. У первых кривая лежит выше остальных, и мы наблюдаем падение температуропроводности при влажности уже 40%. В то время как гипновых наоборот, увеличение значений k , происходит практически до величины влажности 90% и только потом происходит незначительное падение.

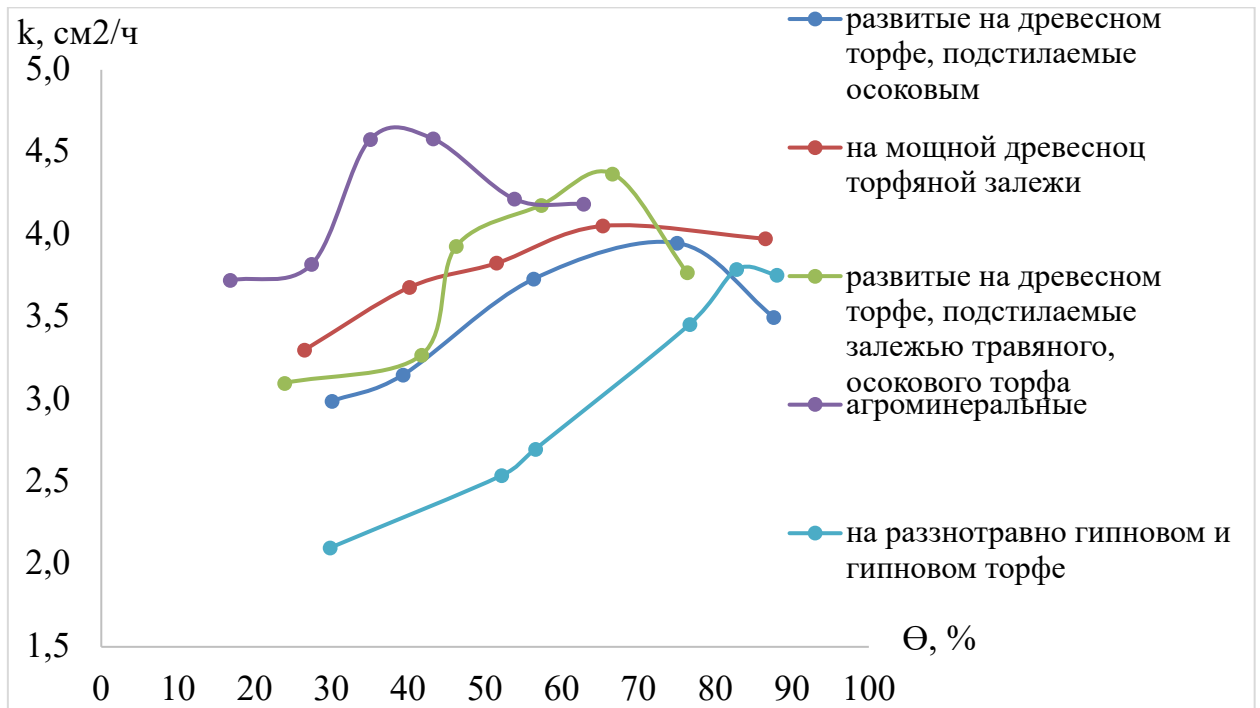


Рисунок 8 – Основная теплофизическая характеристика торфоземов для глубины 5-15см.

Общее расположение кривых для торфов схожих по свойствам носит скученный 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) нам 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 pF равного 1-3 для торфоземов различного

ботанического состава 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 с экспериментальной плотностью представлены в таблице 3.

Таблица 3 – значения плотности для насыпных образцов при определении основной гидрофизической характеристики.

| Название торфозема | Плотность насыпного рыхлого образца, г/см ³ | | Плотность насыпного уплотненного образца, г/см ³ | |
|---|--|-----------------|---|-----------------|
| | Глубина 5-15см | Глубина 25-40см | Глубина 5-15см | Глубина 25-40см |
| торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа | 0,35 | 0,35 | 0,4 | 0,46 |
| торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи | 0,32 | 0,28 | 0,49 | 0,44 |
| торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа | 0,43 | 0,49 | 0,5 | 0,51 |
| торфоземы агроминеральные | 0,75 | 0,21 | 0,9 | 0,3 |
| торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами | 0,17 | 0,12 | 0,23 | 0,22 |

На рисунке 9 представлены кривые ОГХ в координатах «rF- массовая влажность, W (%)» для двух глубин 5-15 (а) и 25-40см (б) торфоземов древесных подстилаемых травяным и осоковым торфом.

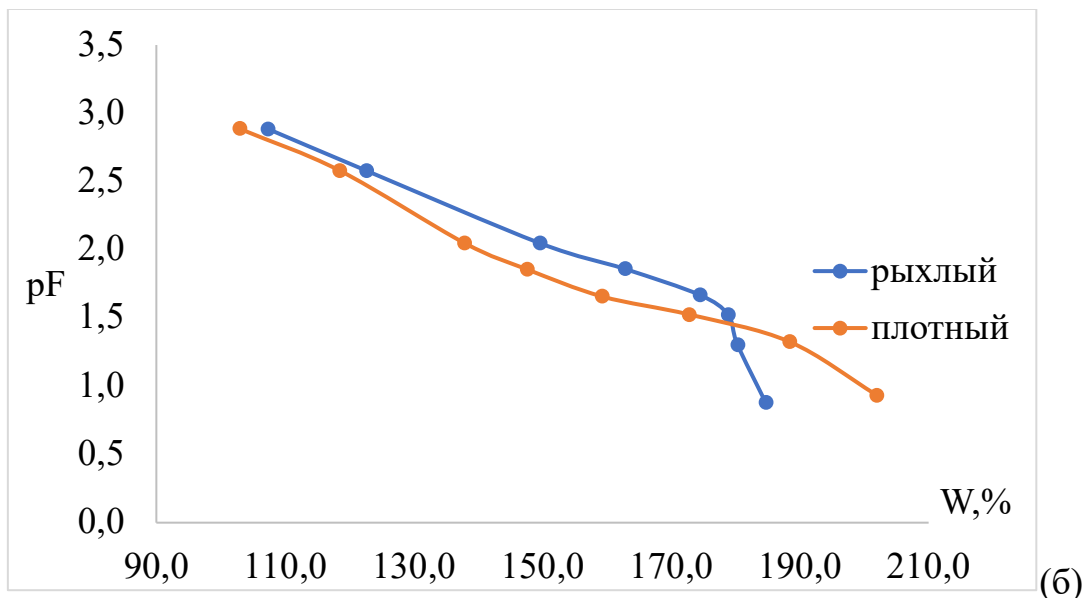
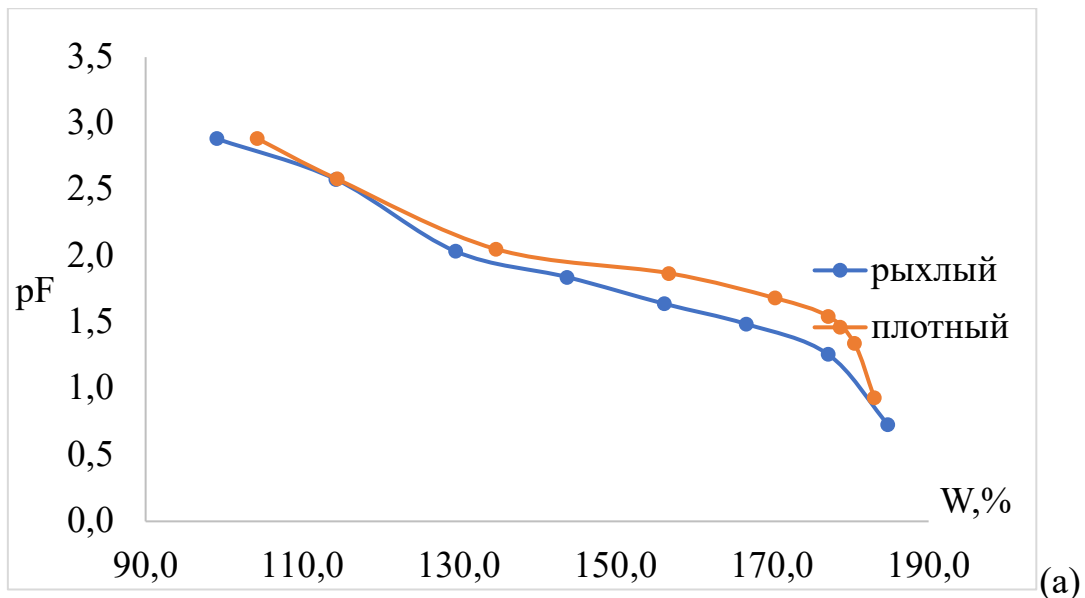


Рисунок 9 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема древесного, подстилаемого травяным, осоковым торфом глубины 5-15 см (а) и 25-40см (б).

Уплотнение в данном случае вызывает неоднозначное смещение кривой. В области низких значений pF мы видим смещение кривых в сторону больших влажностей, в то время как для глубины 25-40см при увеличении значений pF кривая смещается влево.

При этом для торфоземов на мощной древесной торфяной залежи (рисунок 10), агроминеральных (рисунок 12) и гипновых (рисунок 13) картина несколько иная. Здесь влияние уплотнения схоже с минеральными почвами. В

области низких значений pF кривая смещается влево. Такое изменение кривой вероятно связано с изменением толщины капилляров (становятся тоньше), вызывая при этом уменьшение значений влажности, за счет уменьшения количества крупных капилляров, которые удерживают влагу. Такая зависимость наблюдается для двух глубин.

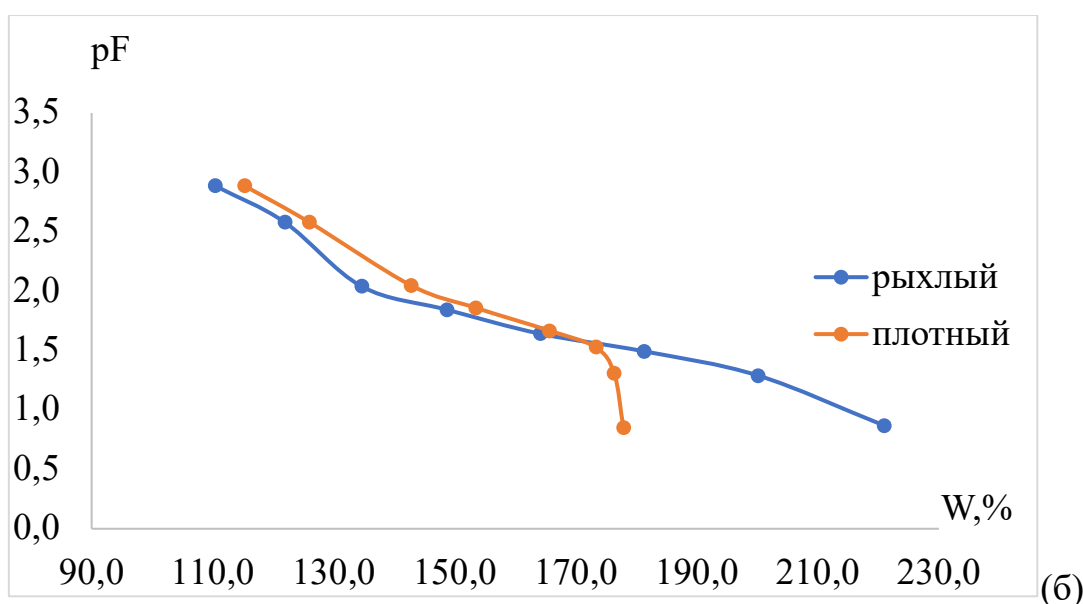
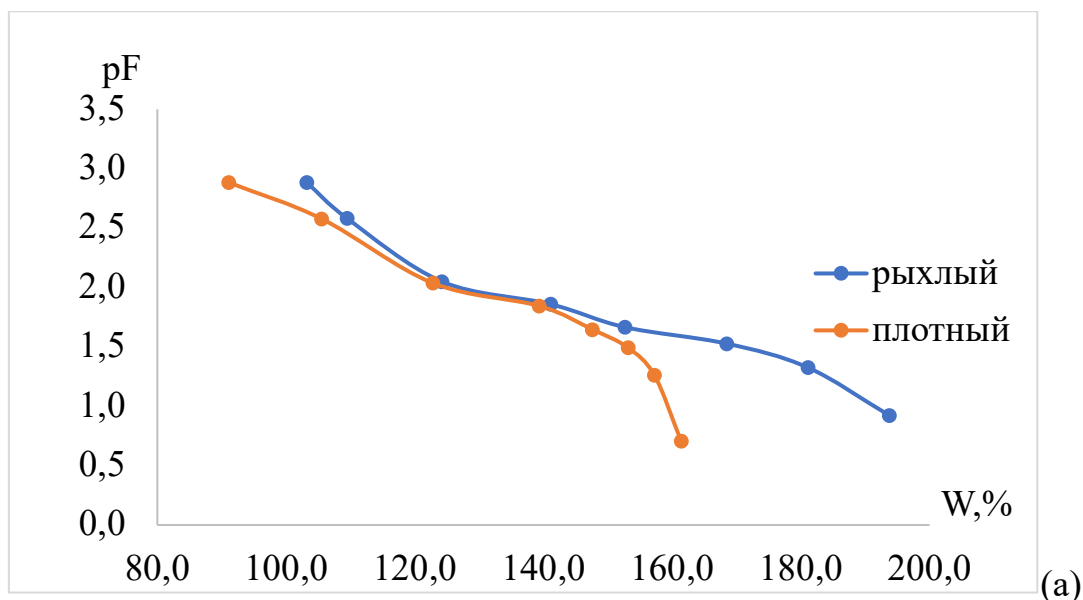


Рисунок 10 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема на мощной древесной торфяной залежи, глубины 5-15 см (а) и 25-40см (б).

Торфоземы древесные подстилаемые травяным и осоковым торфом имели самую высокую степень разложения и зольность среди всех изучаемых почв. Для глубины 5-15 см (рисунок 11 а) изменение положения кривой ОГХ

имеет в целом аналогичный характер по сравнению с древесными торфоземами, однако для глубины 25-40 см (рисунок 11 б) уплотнение смещает кривую вправо на всем диапазоне исследованного rF . Но особенно заметно это смещение в области rF от 0,5 до 1,5, т.е. в области крупных капилляров. Вероятно, в данном случае уплотнение образцов приводит к уменьшению расстояния между частицами, вследствие чего возрастает количество капилляров мезо-размеров, в которых вода удерживается. Крупные же капилляры заметно уменьшаются, что и видно на рисунке 11, особенно в области небольших значений rF , т.е. крупных капилляров.

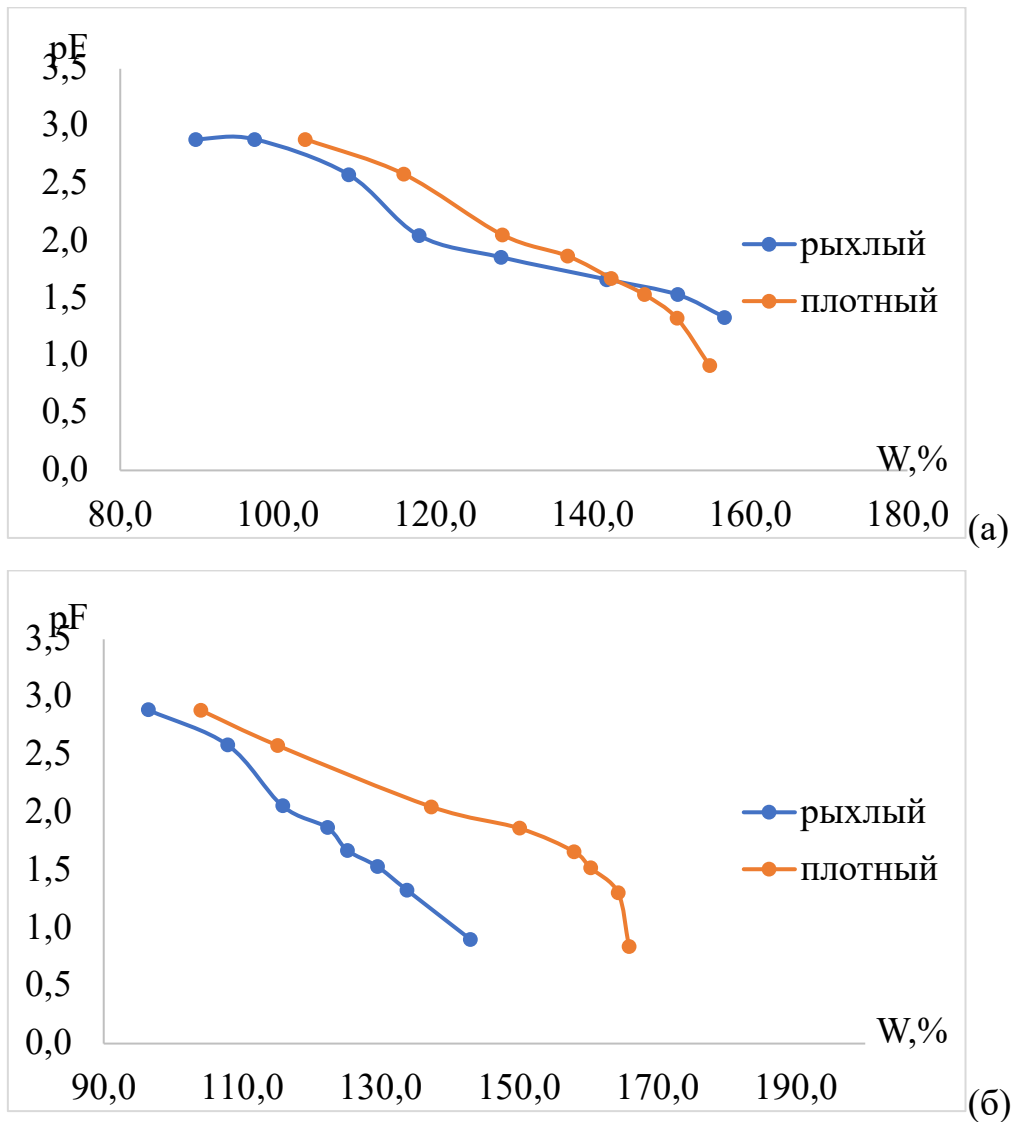


Рисунок 11 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема древесного, подстилаемого травяным, осоковым торфом глубины 5-15 см (а) и 25-40см (б).

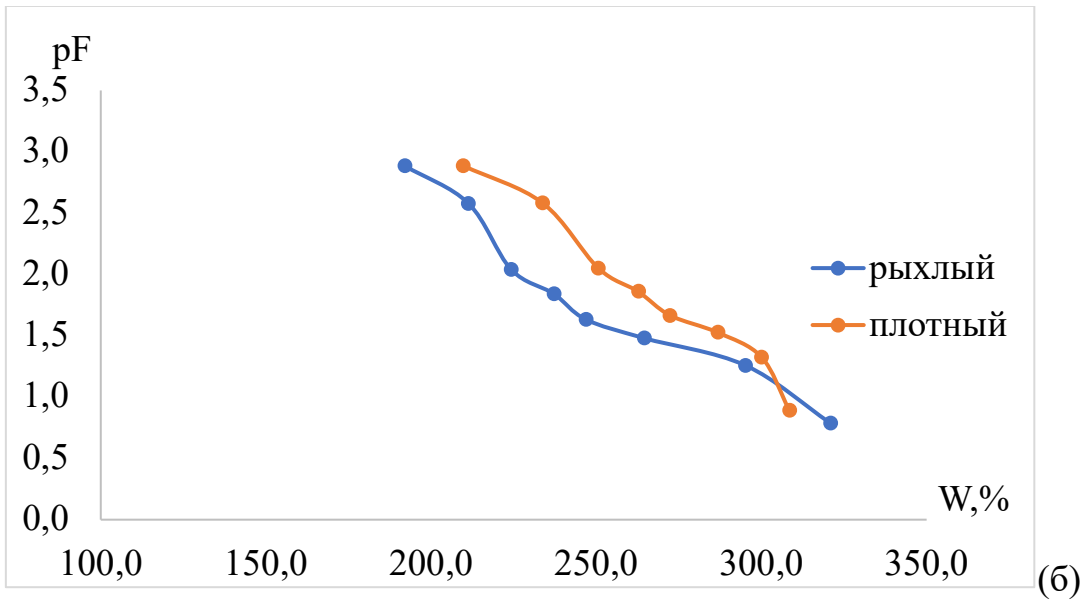
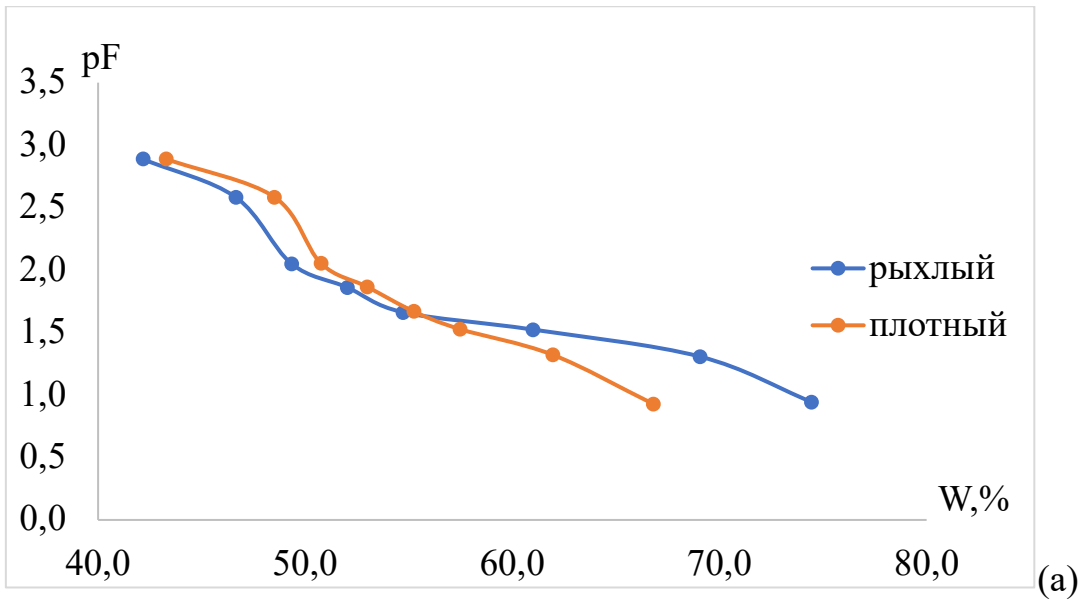


Рисунок 12 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема агроминерального, глубины 5-15 см (а) и 25-40см (б).

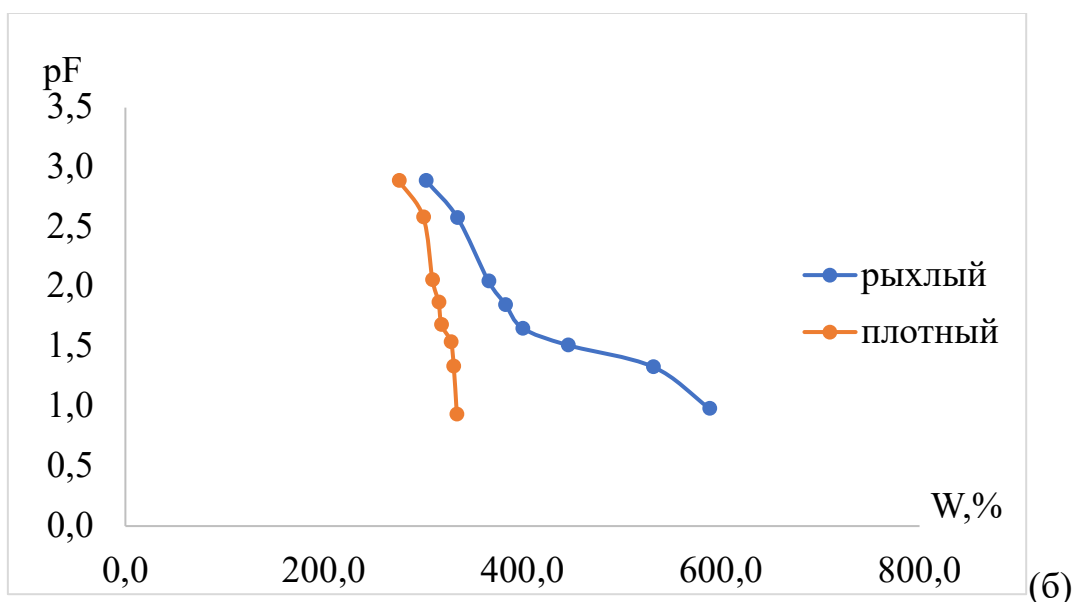
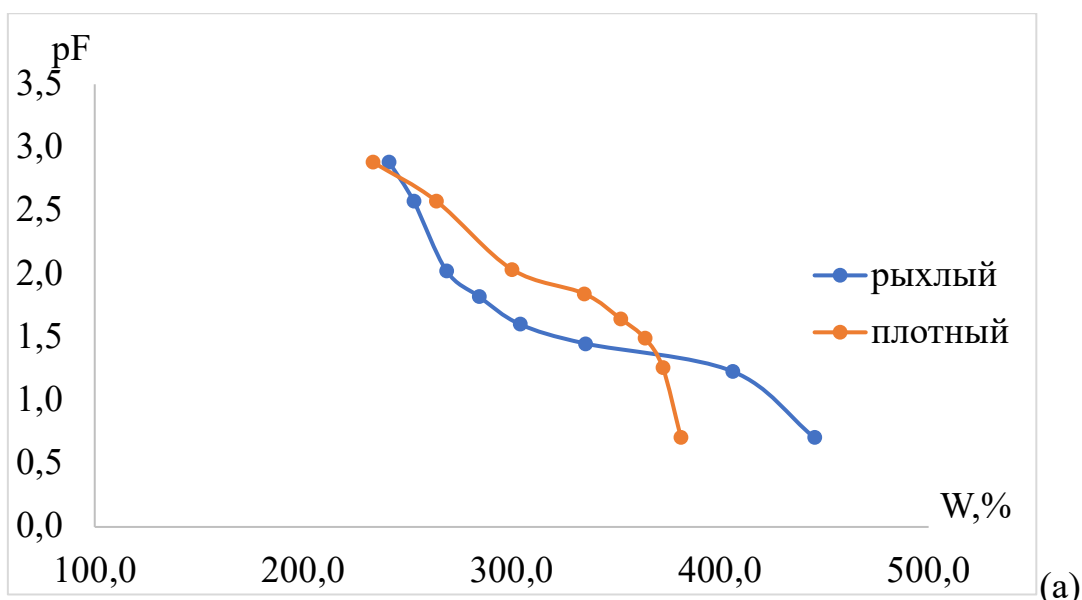


Рисунок 13 – Основная гидрофизическая характеристика для рыхлого и уплотненного торфозема гипнового, глубины 5-15 см (а) и 25-40см (б).

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 Ca и Fe, в то время, как и в большинстве торфов содержание 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, если часть воды связывается химически, то повышается водоудерживающая способность.

Следующим важным свойством торфоземов является степень разложения. Под ней мы будем понимать содержание бесструктурной массы, имеющей в составе гуминовые вещества и остатки растений. В предыдущих главах было описано, что при иссушении торфяных почв изменяется содержание влаги в верхних горизонтах, что неизбежно приводит к активному разложению, за счет изменения аэробных условий. Степень разложения является свойством, на которое влияет несколько факторов, в том числе уровень грунтовых вод, почвообразующие породы, использование земель в различных севооборотах с различными культурами. При использовании пропашных культур процесс идет наиболее эффективно и быстро («Природообустройство полесья», 2019, коллективная монография под редакцией Ю.А. Мажайского и др., книга 4, том 2). На торфоземах Яхромской долины такие культуры используются довольно часто (например, картофель), что приводит к закономерно большим величинам степени разложения от 61 до 87%. Мы рассмотрели, как изменяется водоудерживающая способность почвы с различной степенью разложения. Одним из основных факторов, влияющим на ОГХ, является размер частиц: при его уменьшении, увеличивается водоудерживание. Сам процесс разложения представляет собой измельчение торфяной массы, которая начинает напоминать коллоидальную массу темного цвета (Шеин и др.2018). В ходе эксперимента аналогичная зависимость была выявлена и для исследуемых торфоземов: при увеличении степени разложения, кривая смещается вправо.

Нами было рассмотрено влияние основных свойств торфоземов на водоудерживание. Из рассмотренных данных видно, что все три свойства, - плотность торфоземов, их зольность и степень разложения являются важнейшими факторами водоудерживания торфоземов. Вполне понятно, что в дальнейшем, при выстраивании педотрансферных функций для торфоземов, эти три фактора должны использоваться как аргументы в педотрансферных функциях. Теперь рассмотрим какое из перечисленных свойств вносит наибольший вклад в положение кривой. Были получены трехмерные графики зависимости влажности при одном и том же значении давления от плотности, зольности и степени разложения.

На рисунке 14 представлена зависимость влажности от зольности и степени разложения. График показывает зависимость, аналогичную той которую мы описали отдельно для каждого свойства. При этом зависимость не линейная. Увеличение зольности дает более резкое поднятие графика, чем увеличение степени разложения. Тем самым видно, что зольность оказывает большее по сравнению со степенью разложения влияние на водоудерживающую способность. При этом нелинейность зависимости говорит о влиянии других свойств торфа, скорее всего ботанического состава.

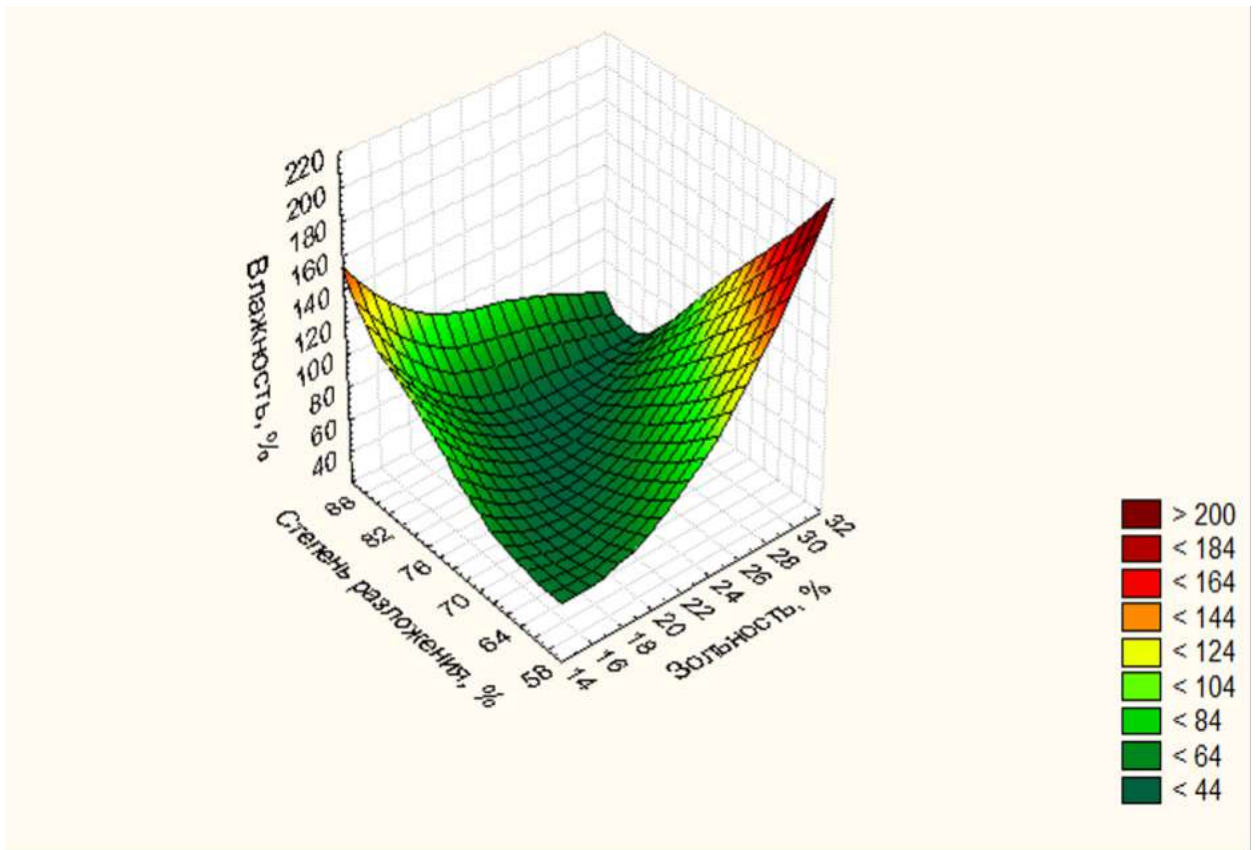


Рисунок 14 – Зависимость влажности (массовые %) от степени разложения (%) и зольности (%).

Сравним влияние плотности и степени разложения, для этого построим график в координатах «Плотность-степень разложения-влажность» (рисунок 15). Зависимость для степени разложения сохраняется. Однако стоит обратить внимание на плотность. Ее увеличение дает более резкое увеличение влажности, аналогично случаю с зольностью. Можно сделать вывод, что плотность и зольность вносят наибольший вклад в водоудерживающую способность в сравнении со степенью разложения. Видимо, эти два свойства и будут являться основными при определении педотрансферных функций для торфоземов. Однако, следует учитывать, что в данном случае, мы рассматривали торфоземы Верхневолжья, в частности, Яхромской долины. Вполне вероятно, что для торфоземов другого происхождения и состава приведенные зависимости могут иметь другой вид, что требует дополнительных исследований в этой области.

Сравним вклад зольности и плотности по графику в координатах «Плотность – Зольность – Влажность» (рисунок 16). На графике видно, что плотность оказывает гораздо более сильное влияние нежели зольность.

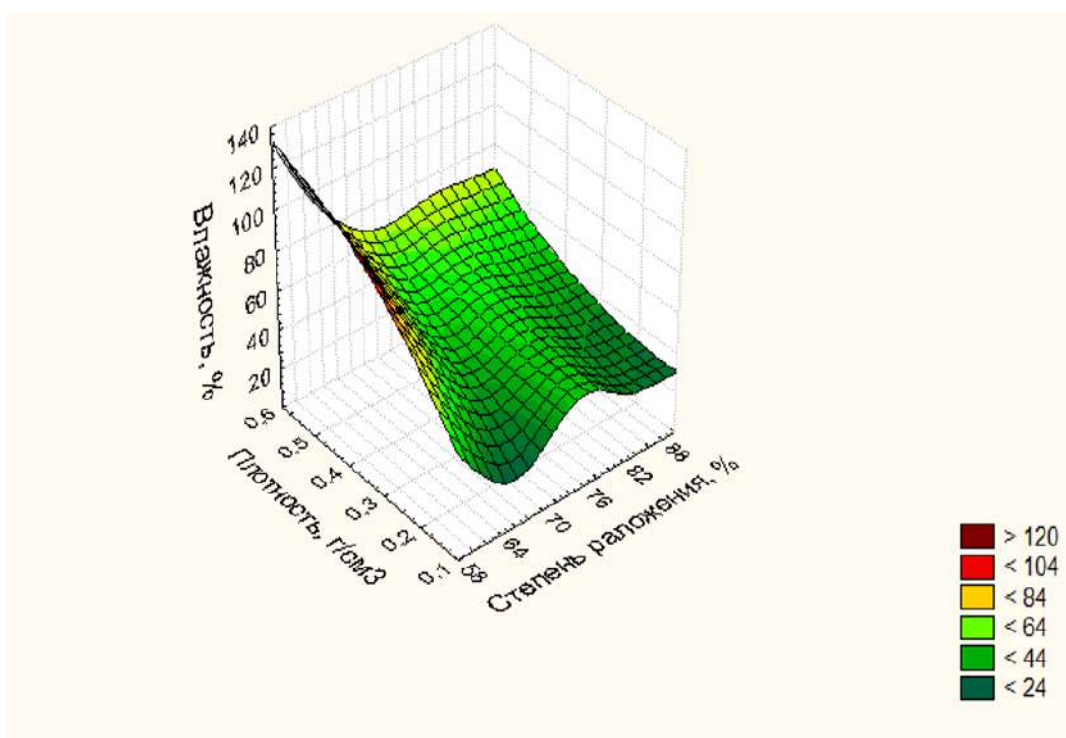


Рисунок 15 – Зависимость влажности (массовые, %) от плотности (г/см³) и степени разложения (%)

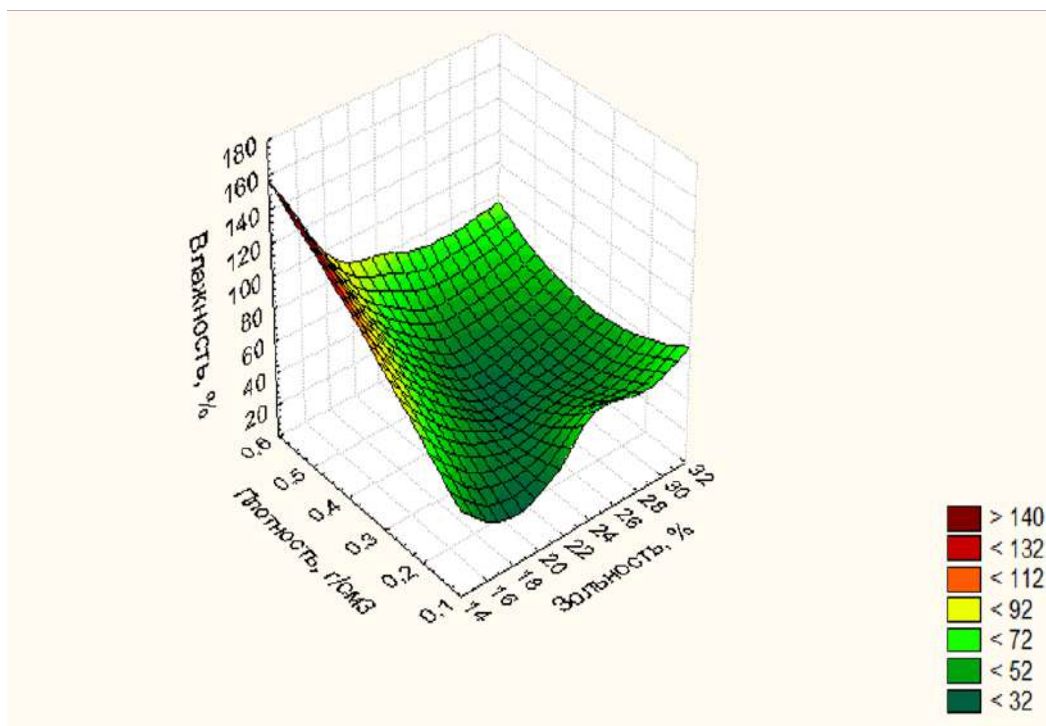


Рисунок 16 – Зависимость влажности (массовые %) от плотности (г/см³) и зольности (%)

По графику мы можем сказать, что при увеличении плотности от 0,2 до 0,5 г/см³ мы видим увеличение массовой влажности от 40 до 155%, в то время как при увеличении зольности от 16 до 30%, влажность увеличивается от 20 до 60%. Таким образом, плотность оказывает более значительное влияние на значения влажности.

Полученные данные были аппроксимированы уравнением ван Генухтана (уравнение 1, приведено в главе 1.1 «Основная гидрофизическая характеристика»). Все параметры аппроксимации получаются значимыми с уровнем значимости 0,001-0,05, кроме параметра «*a*» - величины обратной давлению входа воздуха (Приложение 3, таблицы 1-12). Ранее было отмечено, что эта точка на графике ОГХ для торфоземов выражена слабее чем для минеральных. Это объясняется одним из свойств торфов: для давления входа воздуха должны быть жесткие стенки капилляров, которые у торфов отсутствуют. И мы можем говорить о недостаточно высокой или незначимости параметра «*a*» которая обусловлена физическими особенностями торфоземов, их усадкой и набуханием.

Проанализировав все полученные графики, можно сделать вывод о влиянии таких свойств как: плотность, зольность и степень разложения на положение кривой вододерживания. Наибольшее влияние оказывает плотность. Даже малозаметные ее изменения, на 0,15 г/см³ ведут к значительным смещениям кривой ОГХ. В то время как увеличение зольности и степени разложения показывает аналогичную зависимость, однако их влияние выражено гораздо более слабо. Вероятно, именно эти свойства торфоземов будут свойствами-предикторами при получении педотрансферных функций для органогенных почв, так как именно эти свойства в наибольшей степени влияют на положение и форму ОГХ. В связи с вышеуказанным, предлагается создавать базу данных и рассчитывать педотрансферные функции для торфоземов с указанием плотности при определении ОГХ, зольности, ботанического состава и степени разложения торфяных образцов.

3.2.1 Гистерезис основной гидрофизической характеристики торфоземов

При изучении основной гидрофизической характеристики почв 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 (Mady, Shein, 2021; Kool and Parker, 1987; Mady, Shein, 2018; Likos et al., 2014; Lamorski et al., 2017; Shein, Mady, 2018; Šimůnek et al., 2008; Van Genuchten, 1980). В то время как для органогенных почв таких данных нет. При использовании в сельском хозяйстве это необходимо знать в том числе для орошения, расчёта норм полива. В данной работе были получены кривые ОГХ в режимах иссушения и увлажнения. Кроме того, не совсем ясно вследствие каких 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. Для каждого вида было взято по 2 глубины: 0-20см и 20-40см. Для всех полученных кривых было выявлено явление гистерезиса.

На рисунке 17 представлены полученные кривые для древесных торфоземов в координатах « r_F -Объемная влажность». Кривые имеют s-образный характер, что в целом повторяет форму минеральных почв. Однако, как и кривые, полученные в других наших экспериментах, имеют более плавную форму. Точка перегиба в области r_F 1,5 выражена слабо. Наибольшее значения влажности 60% и 95% соответствуют r_F равному 1,15 для глубин 0-20 и 20-40см соответственно. При низких значениях влажности кривые иссушения и увлажнения практически «склеены» друг с другом, т.е. имеют близкие значения влажности при одинаковом значении r_F . Далее с уменьшением значений давления влаги (с учетом знака), кривые начинают

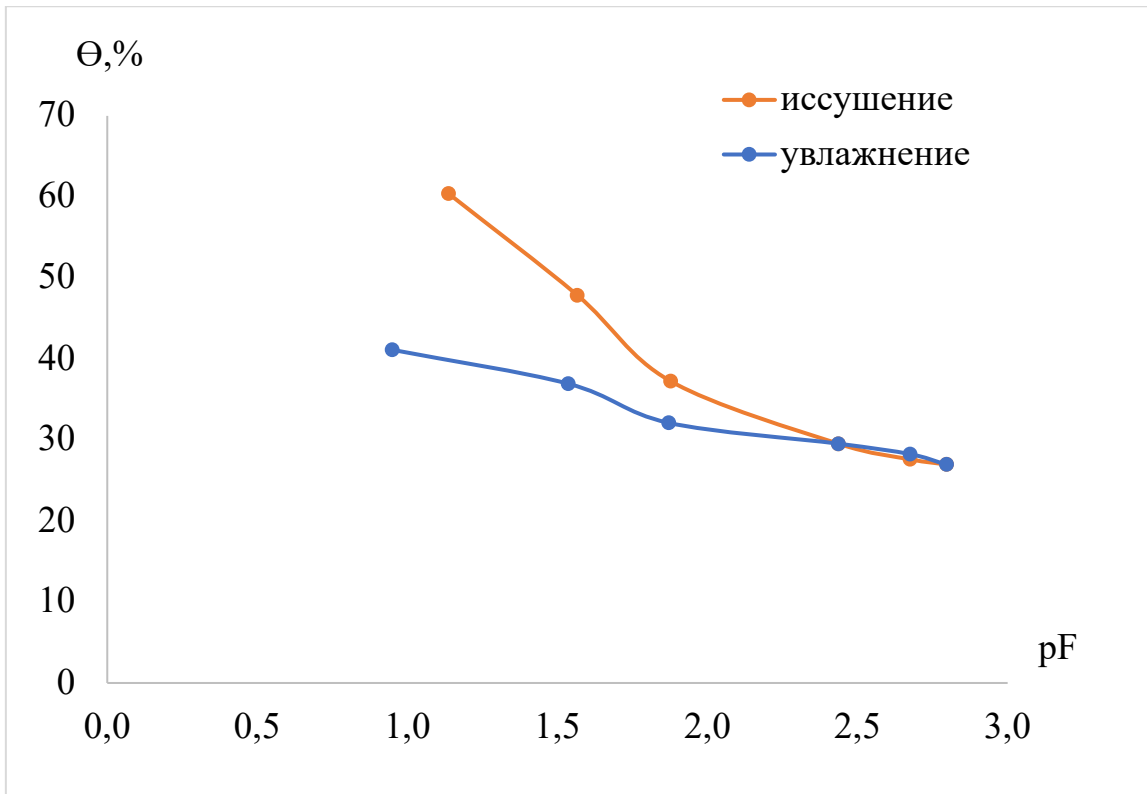
«расходиться», достигая максимального значения при наименьшем значении r_F . Такой внешний вид кривых показывает явление гистерезиса. Стоит обратить внимание, что форма кривых для иссушения и увлажнения отличаются: в режиме увлажнения кривые имеют более плавную форму, точки перегиба практически отсутствуют. Следует 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 различием кривых усадки (ветвь иссушения) и набухания (ветвь увлажнения). Эти различия в поровом пространстве при усадке и набухании и приводят к столь заметным различиям кривых ОГХ при увлажнении и иссушении.

При наименьшем значении r_F наблюдается максимальное расхождение кривых, самая широкая часть петли гистерезиса. Для глубины 0-20 см разница между соответствующими значениями влажности составляет 19%, а для глубины 20-40 см - 34%.

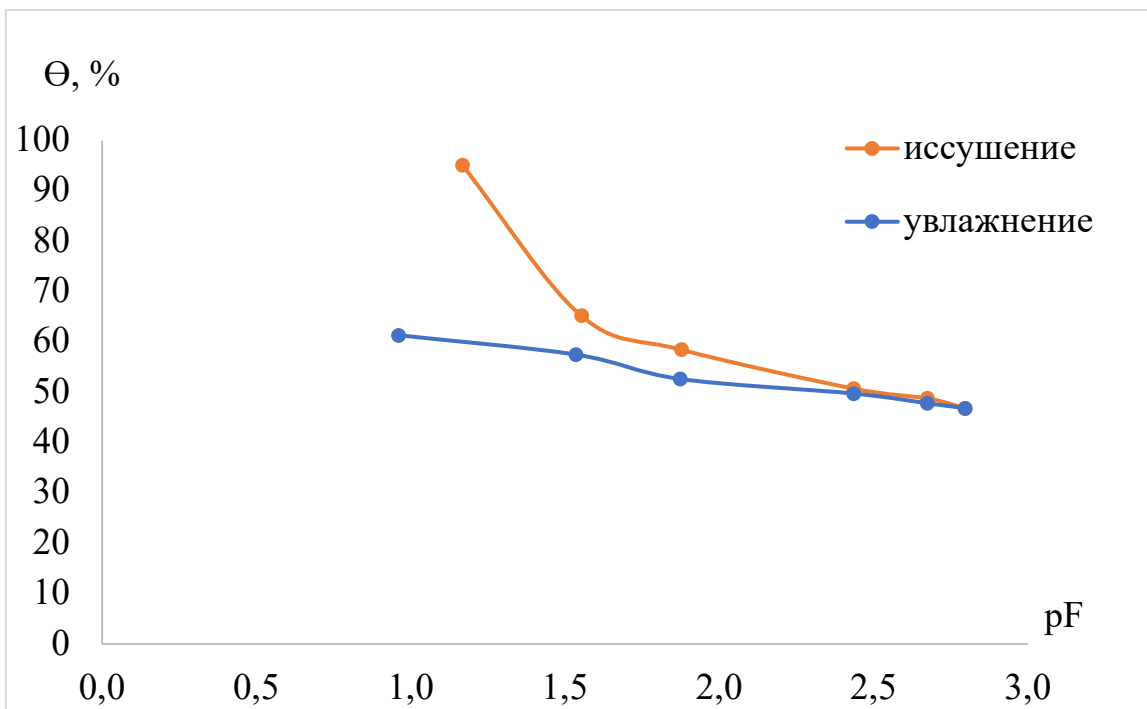
На гистерезис влияют такие факторы как набухание и усадка. Торфяные почвы являются крупнопористыми системами, подверженными этим процессам. Также влияет угол контакта твердого тела и воды, он может изменяться в зависимости от цикла, в котором получена кривая.

Аналогичные кривые были получены также и для агроминеральных торфоземов (рисунок 18). В зависимости от того в каком режиме были получены кривые они также отличаются: в режиме иссушения значения объемной влажности больше при одинаковом значении r_F 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 и 53% для глубины 20-40 см. в сравнении с древесными торфозема точка перегиба в области r_F 1,5-1,8 выражена более значительно, но менее ярко чем в минеральных почвах.



(a)



(б)

Рисунок – 17 ОГХ для торфоземов древесных, подстилаемых травяным осоковым торфом. Глубины 0-20см (а) и 20-40см (б)

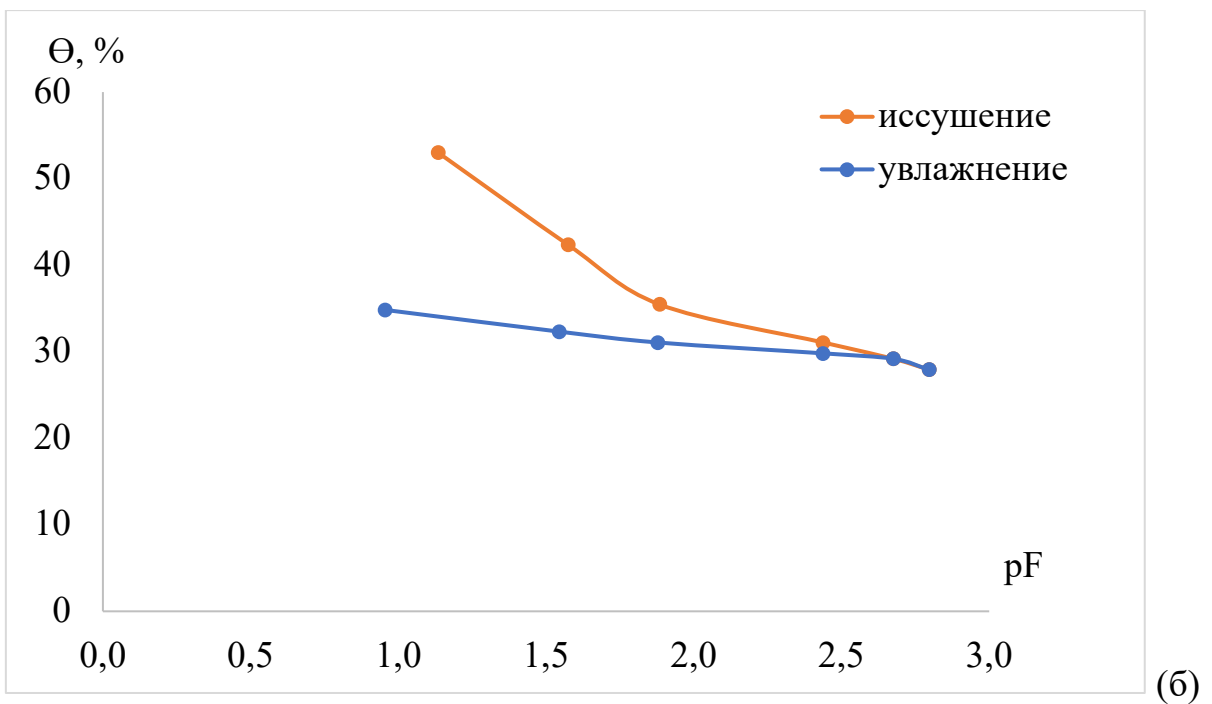
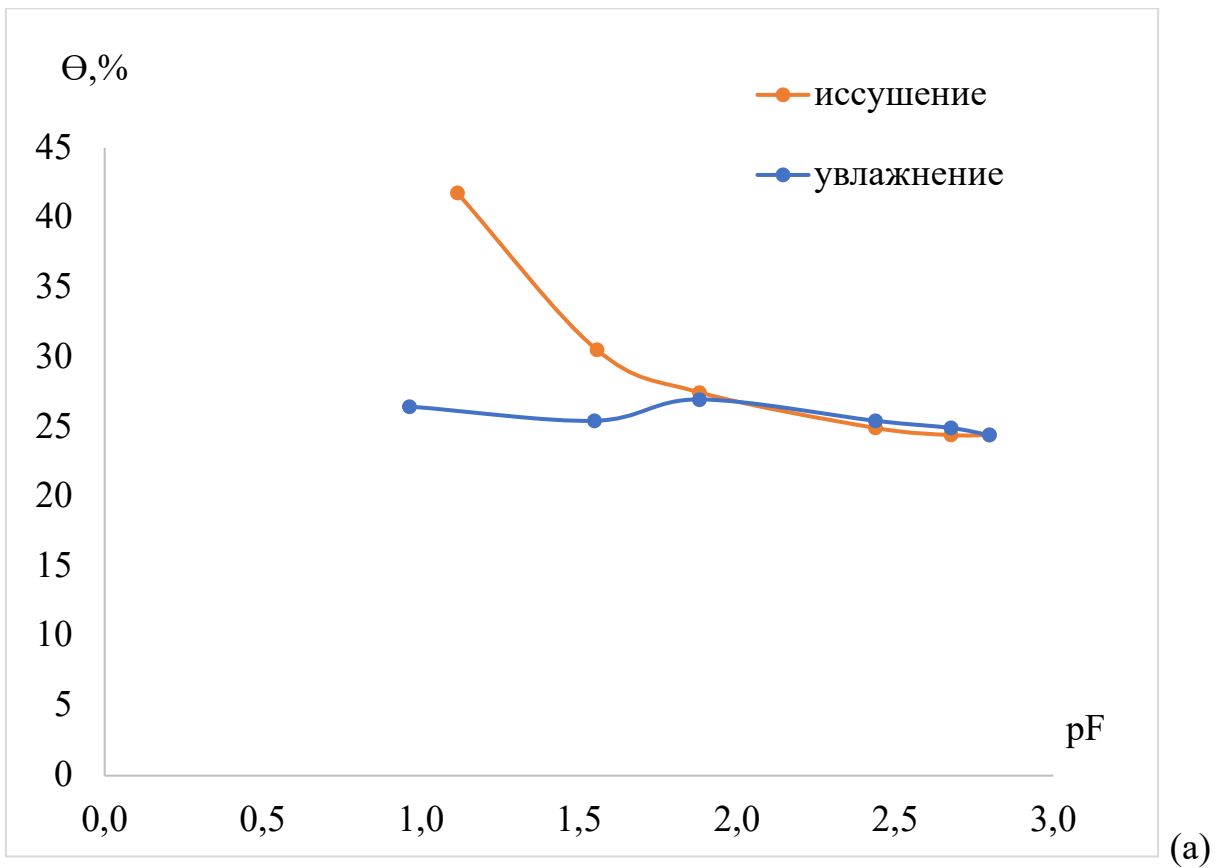
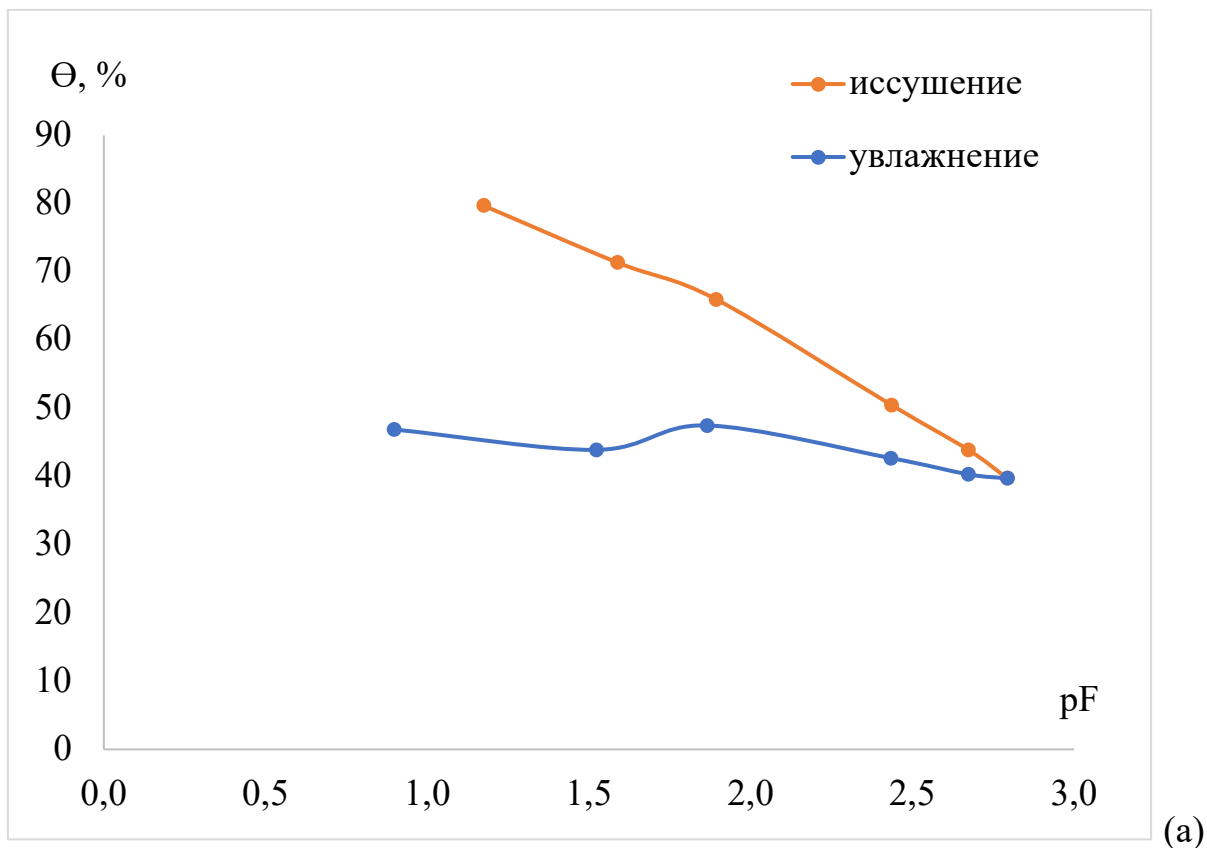


Рисунок – 18 ОГХ для торфоземов агроминеральных. Глубины 0-20см (а) и 20-40см (б)

Также были получены кривые гистерезиса ОГХ для гипновых торфоземов (рисунок 19). 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/см³ для глубин 0-20 и 20-40 см соответственно. Аналогичная связь между этими явлениями была показана в статье Rafrat, S. И др, 2016г.



(a)

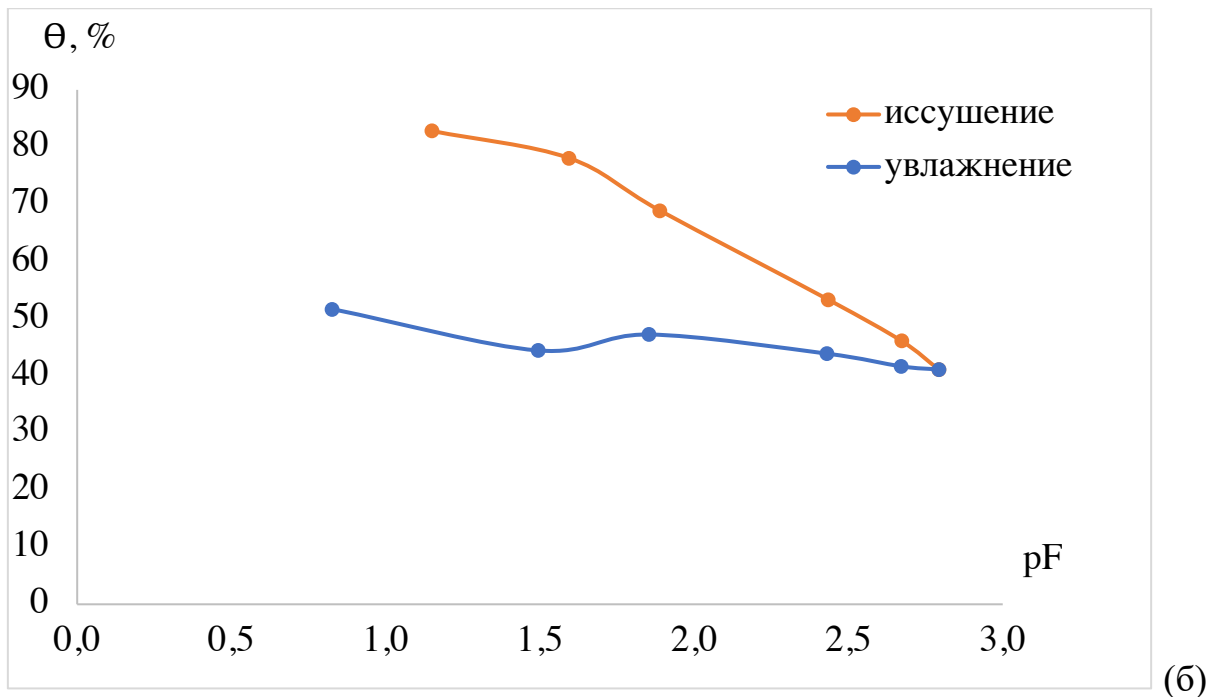


Рисунок 19 – ОГХ для торфоземов гипновых. Глубины 0-20см (а) и 20-40см (б)

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 и сроков поливов 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 расчетных моделей удержания влаги в почве. Результаты экспериментов показывают, что на явление гистерезиса влияет плотность, размер частиц. Также, что кривые имеют схожий внешний вид с минеральными почвами. Новые результаты могут быть очень полезны при моделировании потоков воды в почве.

3.3 Экспериментальная оценка наличия гистерезиса основной теплофизической характеристики торфоземов

Для торфяных почв существует мало информации для регулирования и расчетной оптимизации изменения гидротермического режима, в основе которых лежит зависимость температуропроводности почв от влажности (Архангельская, 2012). Именно эта зависимость лежит в основе расчета температурного режима почв, позволяющая совместно и сопряженно рассматривать водный и тепловой режимы. Действительно, если для расчетов водного режима используется ОГХ (основная гидрофизическая характеристика), 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). 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.

Под гистерезисом в физике почв понимают изменение формы кривой, в зависимости от направления или истории процесса (Шеин и др., 2016; Шеин, 2005). Большинство современных исследований направлены на выявление гистерезиса для кривой водоудерживания минеральных почв, в то время как данных по наличию или отсутствию гистерезиса для кривой температуропроводности на данный момент практически нет. Как известно, одна из наиболее вероятных причин гистерезиса - сложное поровое пространство. Структура порового пространства торфа значительно отличается от минеральных почв. Торф является макропористой системой.

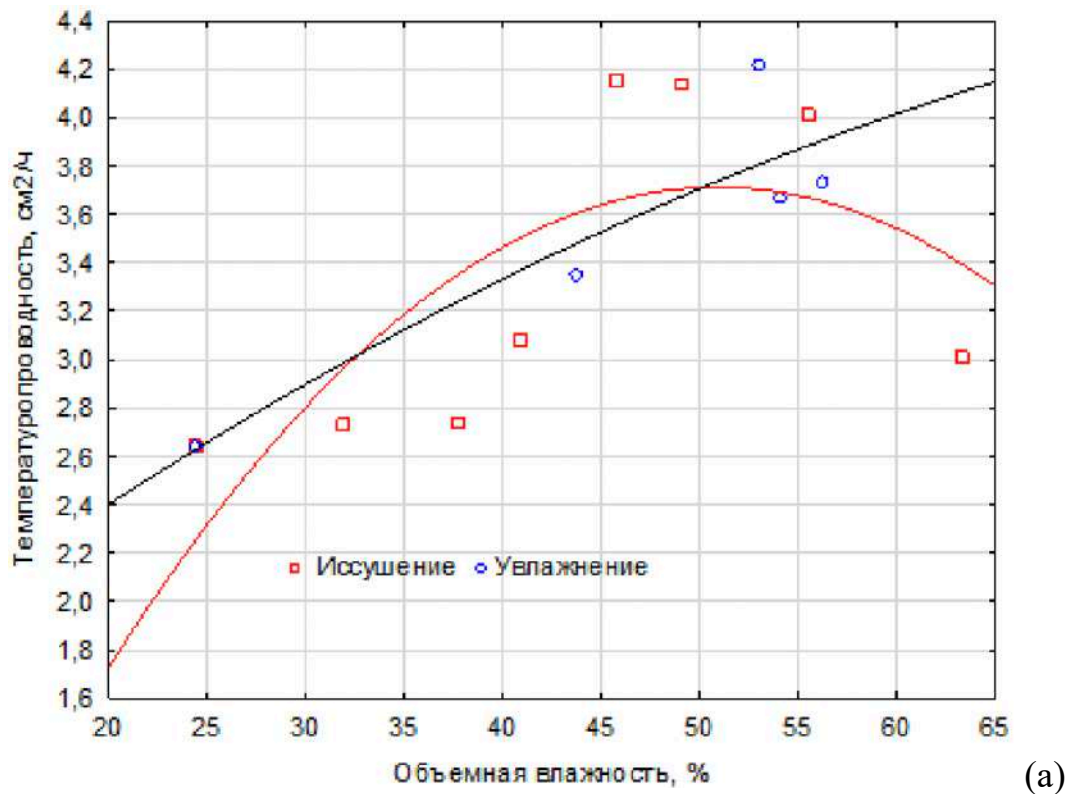
При заполнении его пор водой происходит значительное набухание, в тоже время иссушение может привести к состоянию гидрофобности. При этом происходит «переукладка» частиц, и структура порового пространства изменяется. Для регулирования температурного режима, необходимо знать влияют ли указанные процессы на положение кривой зависимости температуропроводности от объемной влажности и необходимо ли это учитывать при расчетах.

Выбранные объекты исследования в настоящее время активно используются в сельском хозяйстве, в связи с этим необходимо знать их особенности теплового режима. Это позволит выбирать более подходящие культуры для севооборота, а правильный расчет температурного режима позволит увеличить урожайность. Все это может быть возможно только в случае подробного изучения зависимости температуропроводности торфоземов от влажности и составлении прогнозных моделей (Шеин и др., 2019).

На рисунке 20 (а), в качестве примера, представлен график зависимости температуропроводности от влажности торфозема, развитого на древесном торфе, подстилаемого залежью травяного, осокового торфа для слоя 0-20 см, полученные на стадии иссушения и стадии увлажнения. Графики имеют вид куполообразной зависимости, свойственной для минеральных почв. (Arkhangelskaya et al., 2015; Ghader, 2014; Usowicz et al., 2016). Закономерно с увеличением объемного содержания влаги, температуропроводность возрастает, достигая наибольшего значения при влажности 45-50% в обоих случаях. При меньших значениях влажности наблюдается плавное изменение значений коэффициента температуропроводности, в обоих случаях резкое увеличение начинается при близких значениях влажности 40 и 43% для глубин 0-20 и 20-40 см соответственно. Увеличение происходит от 3,1 до 4,2 см²/ч (глубина 0-20 см) и от 3,3 до 4,2 см²/ч (глубина 20-40 см). Наибольшие значения температуропроводности в обоих случаях составляют 4,2 см²/час. Достигая точки максимума значения температуропроводности, начинают

снижаться. Для графиков на стадии увлажнения это менее выражено. Такой вид зависимости можно объяснить увеличением количества воды между частицами, и соответственно уменьшением количества твердофазных контактов.

Для глубины 20-40 см были получены аналогичные зависимости. Максимальные значения температуропроводности близки по значениям к глубине 0-20 см и составляют $3,2 \text{ см}^2/\text{ч}$. Изменения температуропроводности в верхнем горизонте представляют более резкое увеличение, в то время как для глубины 20-40 см они имеют более плавный характер и ярко выраженных перепадов значений нет.



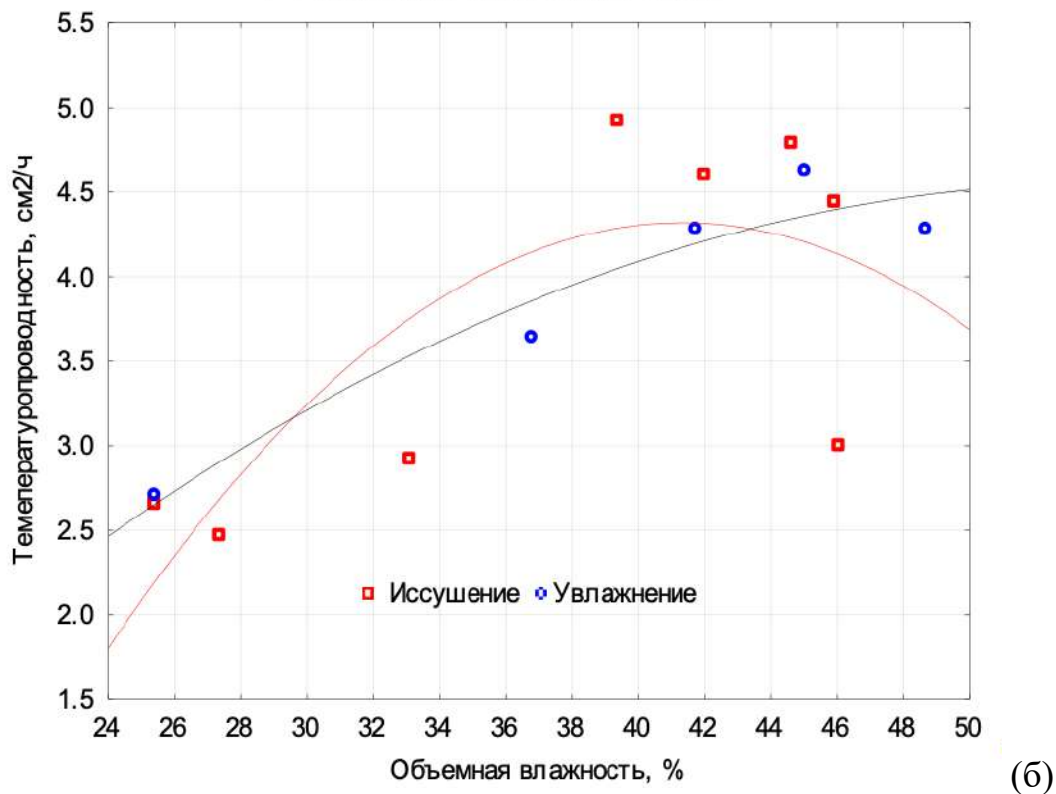


Рисунок 20 – Графики зависимости температуропроводности от влажности для торфоземов древесных, подстилаемых травяным и осоковым торфом (а), торфоземов агроминеральных (б)

На рисунке 20 (б) представлены кривые, полученные для торфоземов агроминеральных с аналогичных глубин. Максимальное значение температуропроводности достигается при значениях объемной влажности 40-45%, и равны $4,9 \text{ см}^2/\text{ч}$ для глубины 5-15 см (для глубины 20-40 прослеживается аналогичная зависимость). После достижения максимума температуропроводность начинает снижаться. При сравнении графиков иссушения и увлажнения, наибольшие полученные значение температуропроводности также близки и равны $4,9 \text{ см}^2/\text{ч}$ и $4,63 \text{ см}^2/\text{ч}$ на стадии иссушения и увлажнения соответственно для глубины 0-20 см; $4,9$, и $4,8 \text{ см}^2/\text{ч}$ для глубины 20-40см. Общий вид графиков имеет также куполообразный характер.

Данные зависимости были получены для торфозема на разнотравном гипновом и гипновом торфе. (табличные данные представлены в Приложении 1). При достижении объемной влажности 60% наблюдается резкое увеличение

температуропроводности в 2 раза. Для данных образцов были достигнуты наибольшие значения влажности 83-84%. Гипновый торф отличается от остальных по своим свойствам, он представляет собой волокнистую массу с остатками растительности. При этом взятые образцы находились в лесу и данный торфозем в настоящее время не подвержен антропогенному воздействию.

Результат насыщения для гипновых торфоземов, отличается от остальных. В двух других случаях, нам удалось практически вернуться к значению влажности, которое было получено при насыщении образца. В случае с гипновым, при достижении влажности 56-59% дальнейшее насыщение практически прекратилось.

В таблице 4 представлены основные параметры аппроксимации зависимости температуропроводности от влажности, полученные в программе Statistica. 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 20-40см. для других полученных данных уровень значимости варьирует от 0,1 до 0,2. Вероятно, необходимо увеличивать количество повторностей и уточнять методику определения температуропроводности лабораторными методами.

Таблица 4 – Статистика параметров аппроксимации (а, b и c) и их достоверность для кривых зависимости температуропроводности (k , см²/ч) от объемной влажности (θ , %) в режимах иссушения и насыщения по уравнению $k(\theta) = a \cdot \theta^2 + b \cdot \theta + c$ (Примечание - знак н/д указывает на то, что кривые достоверно не отличаются при уровне значимости <0.05)

| Название торфозема | Глубина, см | Параметр | Стадия иссушения | | Стадия насыщения | | Достоверность отличий* |
|--|-------------|----------|--------------------|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| | | | Значение параметра | Стандарт. отклонение | Значение параметра | Стандартное отклонение | |
| Торфоземы развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа | 0-20 | a | -0,0021 | 0,0013 | -0,0003 | 0,0018 | н/д |
| | | b | 0,21089 | 0,1155 | 0,0651 | 0,1435 | н/д |
| | | c | -1,6586 | 2,4415 | 1,2246 | 2,615 | н/д |
| | 20-40 | a | 0,0012 | 0,0003 | -0,0023 | 0,0024 | н/д |
| | | b | -0,0944 | 0,0332 | 0,2476 | 0,1741 | н/д |
| | | c | 4,6707 | 0,7886 | -2,1641 | 3,0714 | н/д |
| Торфозем агро-минеральный | 0-20 | a | -0,0084 | 0,0073 | -0,0023 | 0,0024 | н/д |
| | | b | 0,6933 | 0,5278 | 0,2476 | 0,1741 | н/д |
| | | c | -10,0059 | 9,1225 | -2,1641 | 3,0714 | н/д |
| | 20-40 | a | 0,0013 | 0,0009 | 0,0013 | 0,0016 | н/д |
| | | b | -0,0129 | 0,0526 | -0,0354 | 0,0981 | н/д |
| | | c | 3,0480 | 0,6037 | 3,3979 | 1,2932 | н/д |
| Торфоземы, развитые на разнотравно-гипновом и гипновом торфе | 0-20 | a | 0,0011 | 0,0002 | 0,0009 | 0,0001 | н/д |
| | | b | -0,1054 | 0,0242 | -0,0972 | 0,0092 | н/д |
| | | c | 3,8860 | 0,5855 | 3,9072 | 0,17 | н/д |
| | 20-40 | a | 0,0011 | 0,0006 | 0,0019 | 0,001 | н/д |
| | | b | -0,0893 | 0,0646 | -0,1389 | 0,08262 | н/д |
| | | c | 3,401923 | 1,59795 2 | 4,1637 | 1,4862 | н/д |

Зная параметры аппроксимации, можно статистически сравнить зависимости температуропроводности от влажности для процессов иссушения и увлажнения, сделать вывод об их отличиях. Мы делали это с помощью t -критерия, который рассчитывается по формуле (7):

$$t = \frac{|b_n' - b_n''|}{\sqrt{(S_{b_n'})^2 + (S_{b_n''})^2}}, \quad (7)$$

где $S_{b_n'}$ и $S_{b_n''}$ – стандартные отклонения параметров b_n' и b_n'' .

Соответственно если t -критерий оказывается больше табличного для данной степени свободы и уровня значимости (традиционно 0.05), то параметры двух выборок значимо отличаются друг от друга. В этом случае можно утверждать о достоверности различий соответствующих характеристик процесса. 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 можно не учитывать гистерезисные явления, связанные с основной теплофизической характеристикой. 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 тоже 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 при

расчетной оптимизации 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: близкой к полевой и после насыщения образца. Данные по изменению открытой, закрытой и общей пористости представлены в таблице 5.

Под закрытой пористостью понимают процент занимаемый обособленными порами во всем исследуемом образце. Отметим, что томографическая пористость всегда несколько меньше традиционной пористости, определяемой по плотности образца и плотности твердой фазы образца. Это связано с тем, что в томографии довольно трудно отделить по теневым проекциям твердую фазу от истинного порового пространства, что и вызывает явление бинаризации и снижение порового пространства по сравнению с традиционно определяемым (Gostick et al., 2019; Скворцова и др., 2013). В свою очередь, открытая пористость - доля пор, выходящих на поверхность (Абросимов и др., 2021).

При насыщении во всех образцах наблюдается уменьшение открытой пористости. Для торфоземов древесных подстилаемых травяным осоковым торфом и на мощной древесной торфяной залежи происходит наибольшее уменьшение открытой пористости в 14 - 15 раз соответственно. В то время как для агроминеральных и гипновых в 1,6 и 3,2 раза для каждого из них. Значения

закрытой пористости при насыщении также изменяются, но в противоположную сторону - увеличиваются. Наибольшее изменение характерно для 3 точки, где для полевой влажности (41,8% по массе) соответствует значение 0,08%, а для влажности 98,75% значение 3,39%, что говорит об увеличении закрытой пористости в 23 раза.

Таблица 5 – Значения пористости исследованных торфоземов при объеме образца 1006,37мм³ и 1017мм³.

| Название почвы | Массовая влажность, % | Открытая пористость, % | Закрытая пористость, % | Общая пористость, % |
|---|-----------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| Торфоземы древесные, подстилаемые залежью травяного и осокового торфа (точка 1) | 121,8 | 48,52 | 0,1 | 48,57 |
| | 300 | 3,32 | 2,13 | 5,37 |
| Торфоземы развитые на мощной древесной торфяной залежи | 72,9 | 53,51 | 0,14 | 53,58 |
| | 220 | 3,51 | 0,94 | 4,42 |
| Торфоземы древесные, подстилаемые залежью травяного и осокового торфа (точка 3) | 41,8 | 48,42 | 0,08 | 48,49 |
| | 98,75 | 7,38 | 3,49 | 10,61 |
| Торфоземы агроминеральные | 41,5 | 38,06 | 2,11 | 39,36 |
| | 63,23 | 15,15 | 1,08 | 16,08 |
| Торфоземы на разнотравно гипновом и гипновом торфе | 137,8 | 58,21 | 0,38 | 58,37 |
| | 330,56 | 17,98 | 1,19 | 18,96 |

При этом, при насыщении общая пористость уменьшается. Наибольшее значение у гипновых торфоземов, которые в настоящее время не вовлечены в сельское хозяйство. Значение общей пористости у них на 4,79% больше, чем у ближайших к ним по значению торфоземов на мощной древесной торфяной залежи. Вероятно, это связано с уменьшением количества пор при антропогенной нагрузке за счет уплотнения горизонтов, вовлеченных в севообороты.

На основе полученных компьютерных данных, были построены круговые диаграммы распределения пор по размерам. На рисунке 21 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).

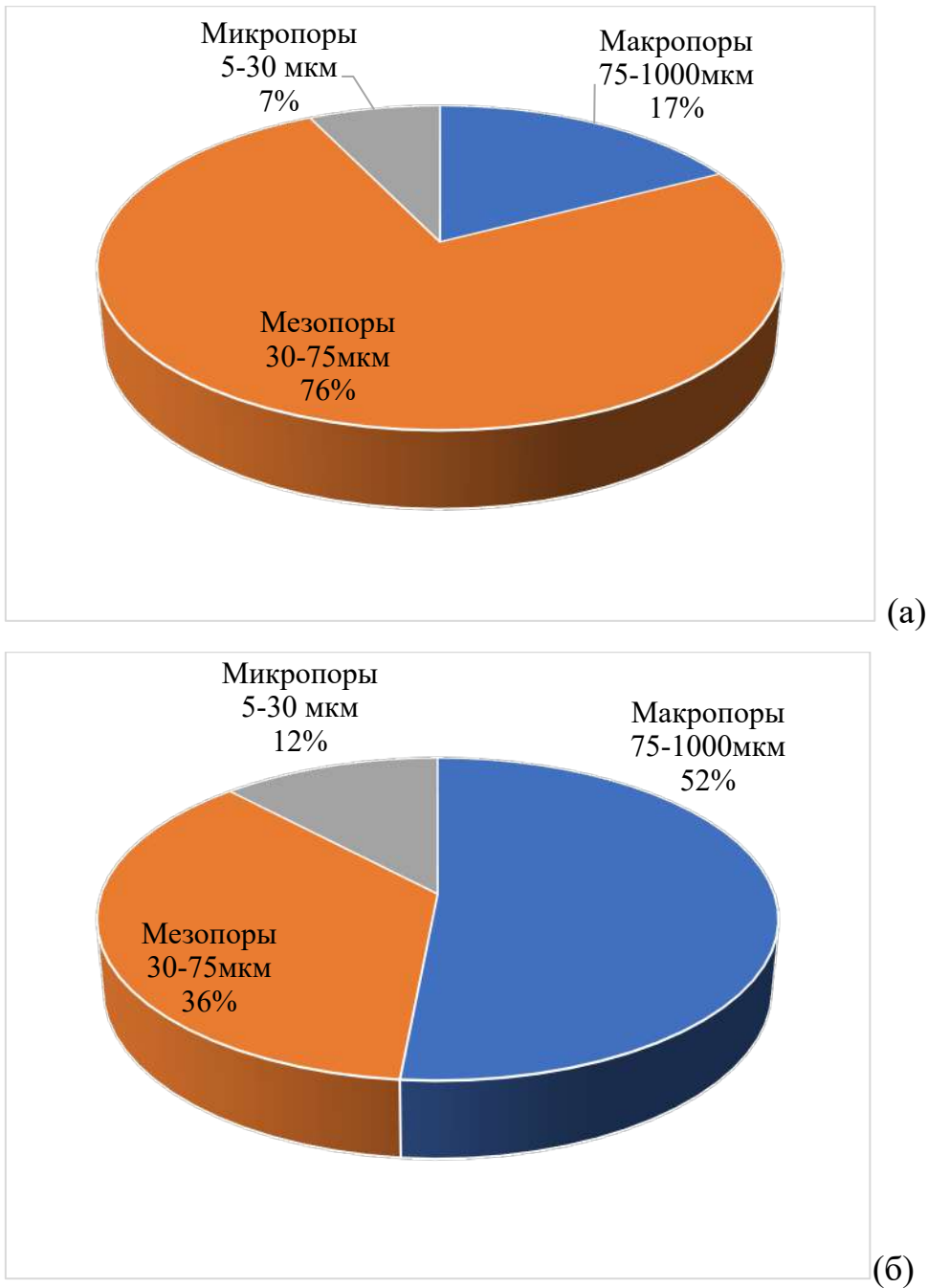


Рисунок 21 – Распределение пор по размерам для торфозема древесного, подстилаемого травяным и осоковым торфом. Стационар Дальний. (а – влажность близкая к полевой; б- насыщенный образец)

Для торфоземов на мощной древесной торфяной залежи диаграмма распределения пор по размерам носит схожий характер (рисунок 22). Общий объем макропор увеличивается с 23 до 51%, а мезопоры сокращаются с 71 до 41%.

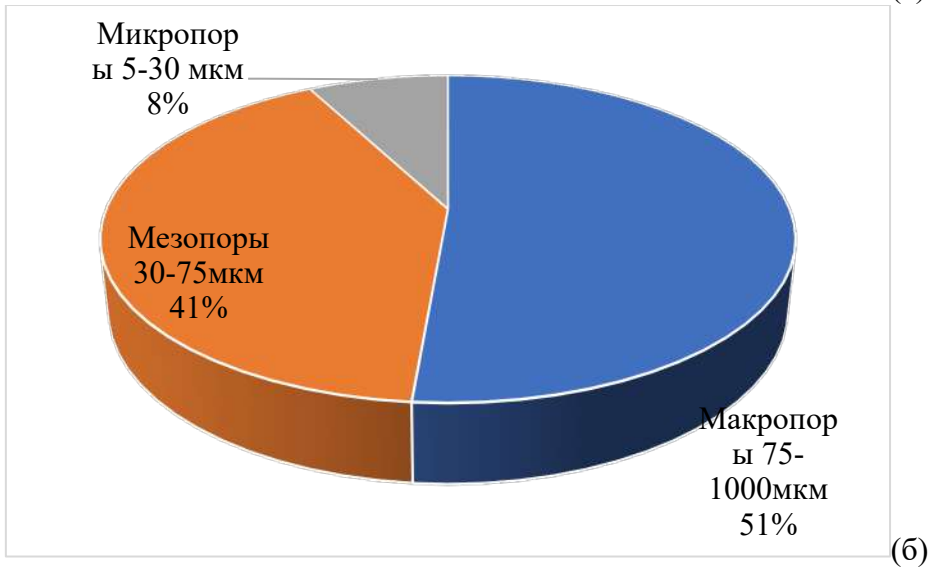
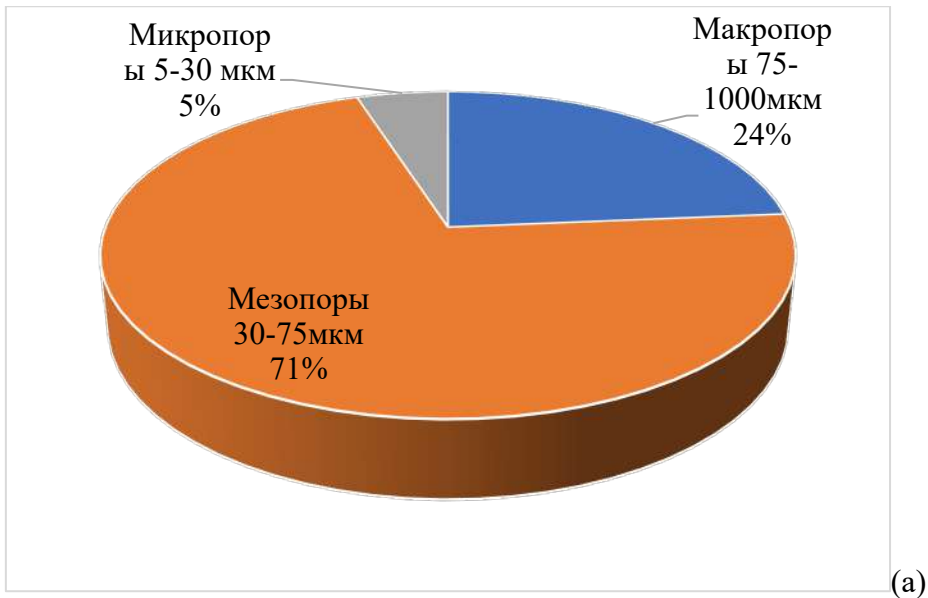
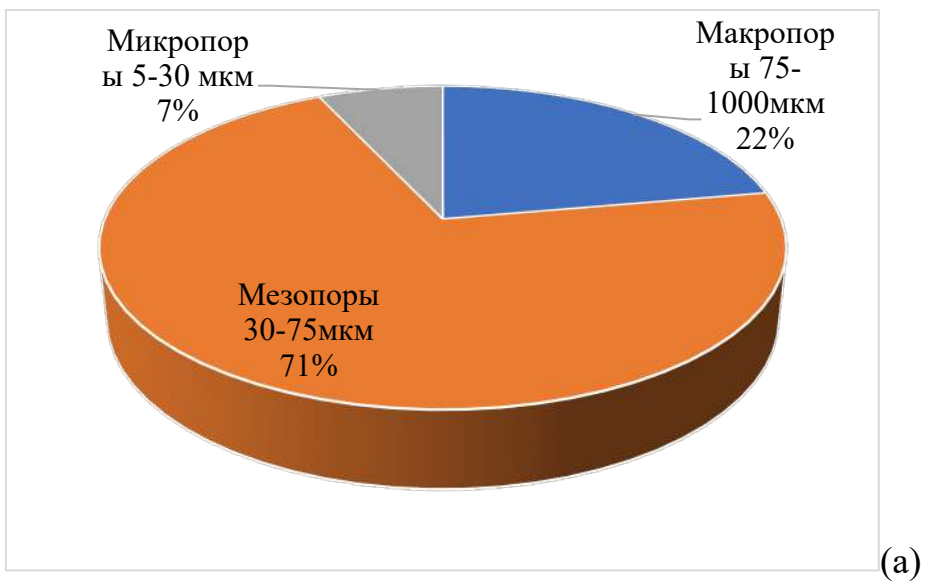


Рисунок – 22 Распределение пор по размерам для торфоземов на мощной древесной торфяной залежи (а – влажность близкая к полевой; б- насыщенный образец)



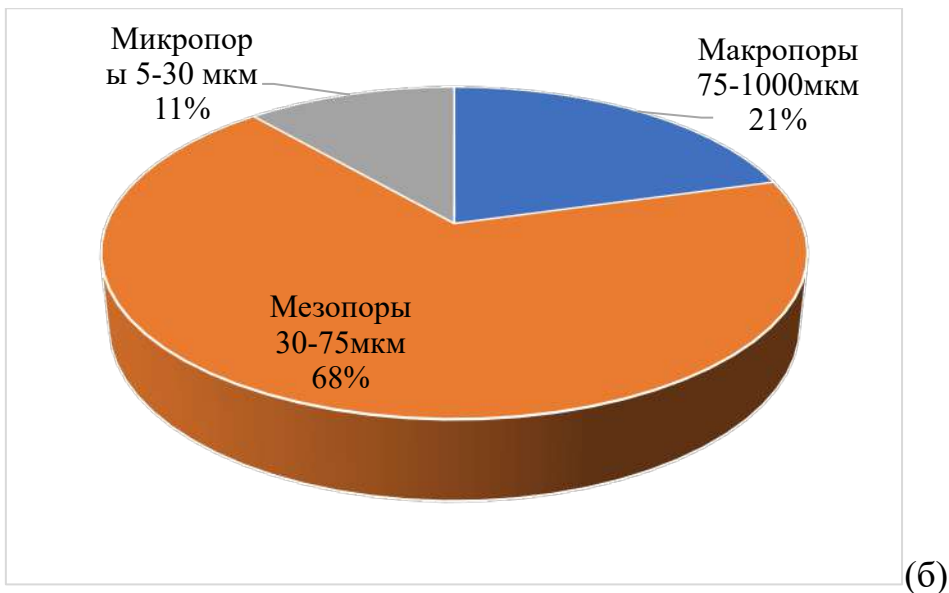


Рисунок 23 – Распределение пор по размерам для торфозема древесного, подстилаемого травяным и осоковым торфом. Стационар Ближний (а – влажность близкая к полевой; б- насыщенный образец).

Что касается торфоземов древесных расположенных на стационаре Ближнем (рисунок 23), то здесь графики для естественной влажности и насыщенного образца практически совпадают. Наблюдается незначительное сокращение макропр с 68 до 71%.

Для агроминеральных торфоземов (рисунок 24) 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%.

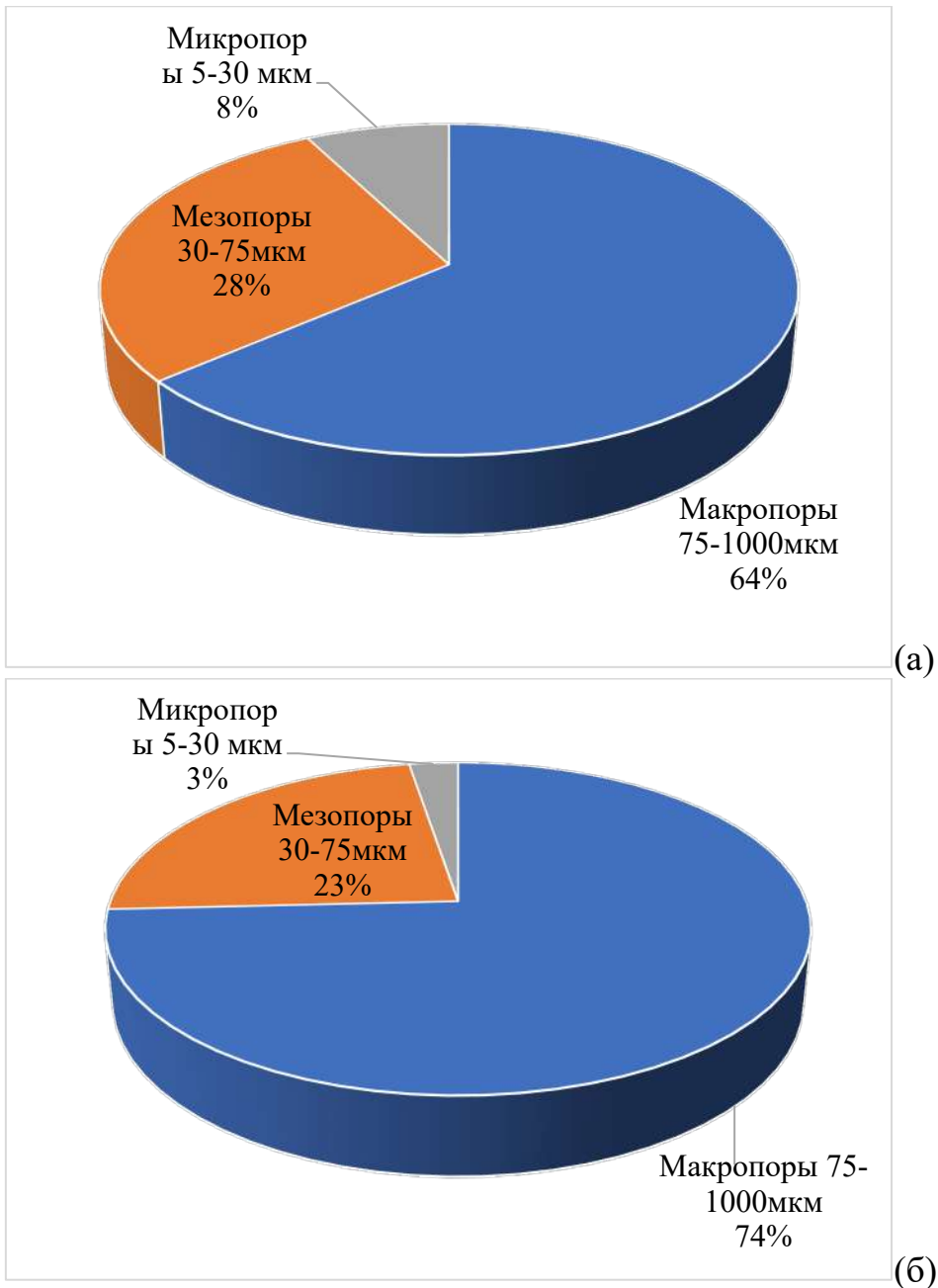
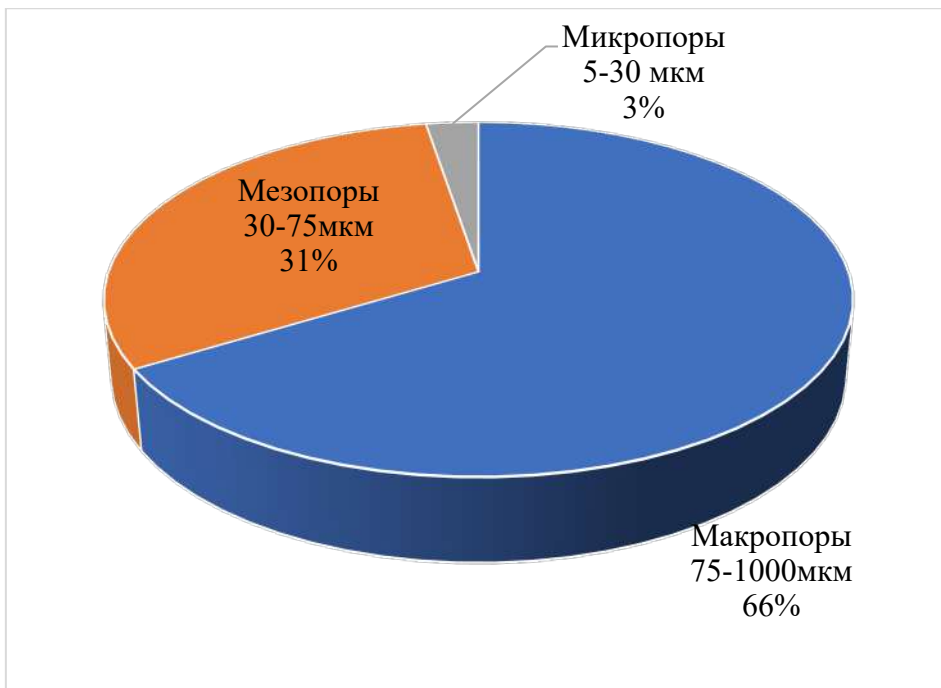
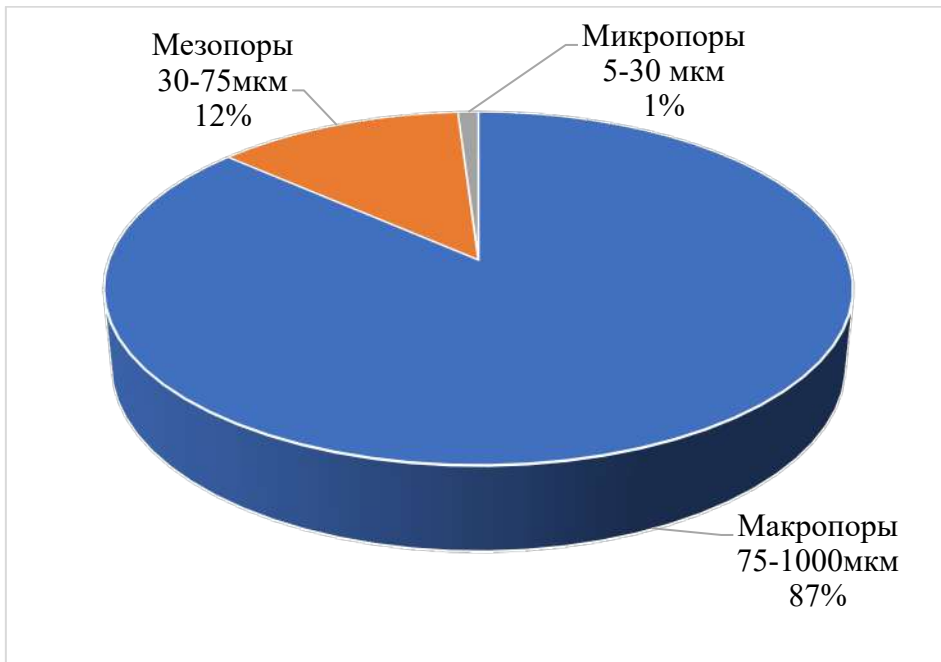


Рисунок 24 – Распределение пор по размерам для торфоземов агроминеральных (а – влажность близкая к полевой; б- насыщенный образец).

100



(а)



(б)

Рисунок 25 – Распределение пор по размерам в торфоземе на разнотравно-гипновом и гипновом торфе (а – влажность близкая к полевой; б- насыщенный образец).

На рисунке 25 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%.

Для всех полученных графиков можно сделать вывод, что 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 диаграммах 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 торфоземе и в древесном торфоземе (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 расчетной оптимизации 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова М.М. Передвижение воды в почве при испарении // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. – Т. 41. – 1953. – С.71-146.
2. Абросимов К. Н., Герке К.М., Фомин Д.С., Романенко К.А., Корост Д.В. Томография в почвоведении: от ранних опытов к современным методам обработки данных (обзор) // Почвоведение. – 2021. – № 9. – С. 1097-1112.
3. Архангельская Т. А. Температурный режим комплексного почвенного покрова //М.: ГЕОС. – 2012. 282 с.
4. Архангельская Т.А., Температуропроводность серых лесных почв Владимирского ополья// Почвоведение – 2004 – №3, С. 332-342.
5. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы определения физических свойств почв и грунтов //М.: Высш. шк. – 1961. – С. 416.
6. Вихляев И. И., Оленин А. С., Рунов Д. И. Справочник по торфу //М., Сельхозгиз. – 1960. 320 с.
7. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во МГУ, 1986. 244 с.
8. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1984.
9. Выржиковский Л.В., Кузьмичев Д.С. Определение влажности торфа емкостным влагометром / Мелиорация и использование осушенных земель, Том XVI, Изд. «Урожай», Минск 1968.
10. Глобус А.М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 355 с Глобус А.М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 355 с.
11. Дюкарев Е. А. Амплитуда суточного хода температуры торфяной почвы //Вестник Томского государственного университета. – 2012. – №. 365.
12. Зайдельман Ф.Р. "Мелиорация почв". М., Изд-во МГУ, 1996. 2-е дополненное и переработанное издание. 382 с
13. Зайдельман Ф.Р. Рекомендации по защите торфяных почв при деградации и уничтожения от пожаров. – М.:Книжный дом «Либроком», 2011, 50 с.

14. Зайко С. М., Вашкевич Л. Ф., Бачила С. С. Состояние осушенных ландшафтов и почв и основные положения их использования. – 2001, С.95-117
15. Зейлигер А. М., С. Тамари. Способы формального представления гидрофизических характеристик водоудерживания и влагопроводности почв // Почвоведение, 1995. № 2. с. 192-199.
16. Инишева Л. И. Болотоведение, Издательство: ТГПУ, 2009, 210 с
17. Инишева Л. И., Махлаев В. К. Мелиоративные режимы пойменных торфяников, Томск: НЦТИ – 2001
18. Качинский Н.А. Физика почвы. Ч.2. М.: Высшая школа, 1970. 358 с.
19. Киндерис З.; Зеленка Л.; Бальчюнас А.И., Опыт осушения земель закрытым дренажем, М.: Колос, 1975. - 320 с
20. Методы определения степени разложения / ГОСТ 10650-2013
21. Минкина Ц. И., Белякова В. Я., Старцева Н. Д. Исследование основного участка опытного хозяйства ЦТБОС. – 1966.
22. Минкина Ц.И. Торфяные залежи поймы реки Яхромы и их агрономическая оценка / Ц.И. Минкина // Научные труды ЦТБОС. - 1972. - Вып. 1. - С. 7-30
23. Мировая реферативная база почвенных ресурсов [Научные редакторы перевода М.И. Герасимова, П.В. Красильников]. – 2014. – 202 с.
24. Мисников О. С. Изменения водно-физических свойств торфа и торфяных залежей при техногенном воздействии //Техника и технология горного дела. – 2019. – №. 2. – С. 19-32.
25. Моторин А. С. Влагообеспеченность многолетних трав на осушаемых торфяных почвах Северного Зауралья //Аграрный вестник Урала. – 2017. – №. 12-1 (166).
26. Назарова Т. В. Влияние содержания органического вещества на энергетическое состояние влаги в почве: дис. – Московский государственный университет имени МВ Ломоносова (МГУ), 2009.
27. Поздняков А.И., Ковалев Н.Г., Мусекаев Д.А., Поздняков Л.А., Позднякова А.Д., Широкова Е.В., Бородкина Р.А., Шваров А.П., Дуброва

М.С., Торф и эутрофные торфоземы при длительном сельскохозяйственном использовании // М. – 2014. 356 с.

28. Поздняков Л. А. Оценка биологической активности торфяных почв по удельному электрическому сопротивлению // Почвоведение. – 2008. – №. 10. – С. 1217-1223.

29. Полуэктов Р. А., Терлеев В. В., Бакаленко Б. И. Использование динамических моделей в информационных технологиях точного земледелия // Машинные технологии производства продукции в системе точного земледелия и животноводства. – 2005. – С. 142-147.

30. Природообустройство Полесья, книга 4, том 2 / под редакцией Мажайского Ю.А., Рокочинского А.Н., Зайдельмана Ф.Р., Волчека А.А., Иванова Д.А., Мешика О.П., Езнаха Е., Рязань: Мещер. ф-л ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова», 2019

31. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Рождественская Т.А., Балыкин С.Н., Сравнительный анализ основной гидрофизической характеристики степных и горнолесных почв Алтая, восстановленной расчётными методами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 12 (122), 2014

32. Рабинович Г. Ю., Поздняков Л. А., Дуброва М. С. Деграционные процессы в осушенных низинных торфяных почвах яхромской поймы при длительном сельскохозяйственном использовании // Сборник конференции «Мелиорация и водное хозяйство: проблемы и пути решения.», том II. Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова – 2016. – С. 239-243.

33. Рабинович, Г. Ю., Широкова, Е. В., Поздняков, Л. А., Позднякова, А. Д., Анциферова, О. Н. Пантелеева, Т. Н. Деграционные процессы в мелиорированных низинных торфяных почвах ландшафтов Яхромской долины // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири., Монография. В 5 томах. Том II. Под редакцией В.Г. Сычева, Л. Мюллера. Москва, 2018

Издательство: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова (Москва) – 2018. – С. 306-310.

34. Рабинович, Г. Ю., Широкова, Е. В., Поздняков, Л. А., Позднякова, А. Д., Анциферова, О. Н. Дуброва, М. С. Новые методы оценки трансформации почвенного покрова торфяных массивов и изменения показателей почвенного плодородия при различных уровнях антропогенного воздействия / Отчет о научной работе ФГБНУ ВНИИМЗ – 2018.

35. Роде А. А. К вопросу о “водно-физических константах” почвы //Почвоведение. – 1961. – №. 6. – С. 20.

36. Роде А.А. Методы изучения водного режима почв. М.: Изд-во АН СССР, 1960.

37. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Т.2. Л.: Гидрометеиздат, 1969.

38. Роде А.А. Почвенная влага, М.: Издательство академии наук СССР, 1952

39. Романов В.В., Гидрофизика болот / Л.: Гидрометеиздат, 1961. - 306с

40. Скворцова, Е. Б., Герке, К. М., Корост, Д. В., & Абросимов, К. Н. Структура порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (анализ 2D и 3D изображений) //Бюллетень почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2013. – №. 71.

41. Скрынникова И. Н. Классификация целинных болотных и мелиорированных торфяных почв СССР //почвоведение. – 1964. – №. 5. – С. 14-27.

42. Судницын И.И. Движение почвенной влаги и влагообеспеченность растений. М.: Изд-во МГУ, 1979. 255 с

43. Теории и методы физики почв / под ред. Шеина Е.В., Карпачевского Л.О. Тула: Гриф и К, 2007. 616 с

44. Терлеев В. В., Дунаева Е. А., Гиневский Р. С., Лазарев В. А., Топаж А. Г., Почвенно-гидрофизическое информационное обеспечение прецизионного ирригационного земледелия //Таврический вестник аграрной науки. – 2021. – №. 2. – С. 244-260.

45. Тяботов И.А., Дылдин А.Г., Особенности торфяных почв вследствие пожаров и мероприятия по их охране / Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа по регионам» - 2014
46. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 266 с.
47. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв // Дисс. на соиск. уч. степ. докт. биол. наук., 2008. 355 с.
48. Умарова А. Б., Шеин Е. В., Кухарук Н. С. Основная гидрофизическая характеристика агросерых почв: влияние анизотропии и масштабного фактора //Почвоведение. – 2014. – №. 12. – С. 1460-1460.
49. Черноусенко Г. И., Судницын И. И. Влияние физических свойств торфяных почв на миграцию влаги и её потребление растениями. – 2019.
50. Шеин Е. В. Гидрология почв: этапы развития, современные тенденции, ближайшие перспективы //Почвоведение. – 2010. – №. 2. – С. 175-185.
51. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с
52. Шеин Е. В., Мазиров, М. А., Микайылов Ф. Д., Мартынов А. И. Теплофизические характеристики почв-основа расчета и управления тепловым режимом почв //Земледелие. – 2016. – №. 6.
53. Шеин 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.
54. Шеин 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.
55. Шеин Е. В., Скворцова Е. Б., Дембовецкий А. В., Абросимов К. Н., Ильин Л. И., Шнырев Н. А. Распределение пор по размерам в суглинистых почвах: сравнение микротомографического и капилляриметрического методов определения //Почвоведение. – 2016. – №. 3. – С. 344.

56. Abad M., Noguera P., Bures S. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain //Bioresource technology. – 2001. – T. 77. – №. 2. – C. 197-200.
57. Abu-Hamdeh N. H., Reeder R. C. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter //Soil science society of America Journal. – 2000. – T. 64. – №. 4. – C. 1285-1290.
58. Arkhangel'skaya T. A., Luk'yashchenko K. I., Tikhonravova P. I. Thermal diffusivity of typical chernozems in the Kamennaya Steppe reserve //Eurasian soil science. – 2015. – T. 48. – №. 2. – C. 177-182.
59. Arkhangel'skaya T. A., Gvozdkova A. A. Thermal diffusivity of peat-sand mixtures //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – T. 368. – №. 1. – C. 012005.
60. Barber K. E. Peatlands as scientific archives of past biodiversity //Biodiversity & Conservation. – 1993. – T. 2. – №. 5. – C. 474-489.
61. Beber C. C. L. Determinação da difusividade térmica de solos do tipo latossolo vermelho em função do teor de umidade : дис. – Dissertação de Mestrado, URNERS, DeFEM. Ijuí, RS–Brasil, 2006.
62. Bechtold M., Dettmann, U., Wöhl, L., Durner, W., Piayda, A., Tiemeyer, B. Comparing methods for measuring water retention of peat near permanent wilting point //Soil Science Society of America Journal 82 (2018), Nr. 3. – 2018. – T. 82. – №. 3. – C. 601-605.
63. Bohlin C., Holmberg P. Peat: Dominating growing medium in Swedish horticulture //International Symposium on Growing Media and Hydroponics 644. – 2004. – C. 177-181.
64. Bolt G.H. Soil Physics Terminology. - 1976
65. Bruce R. R. Hydraulic conductivity evaluation of the soil profile from soil water retention relations //Soil Science Society of America Journal. – 1972. – T. 36. – №. 4. – C. 555-561.

66. Campbell G. S. Improved thermocouple psychrometers for measurement of soil water potential in a temperature gradient //Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1979. – T. 12. – №. 8. – C. 739.
67. Crestana S. Water Physics Study on Soil Using Computerized Tomography, (in Portuguese), Ph.D. Thesis. USP. Saõ Carlos, Saõ Paulo. 1985. P. 151
68. Danelichen V. H., Biudes M. S., Souza M. C., Machado N. G., Curado L. F., Nogueira J. S. Soil thermal diffusivity of a gleyic solonetz soil estimated by different methods in the Brazilian Pantanal. – 2013.
69. de Moraes Danelichen V. H., Biudes M. S. Avaliação da difusividade térmica de um solo no norte do Pantanal //Ciência e Natura. – 2011. – T. 33. – №. 2. – C. 227-240.
70. Dissanayaka S. H., Hamamoto S., Kawamoto K., Komatsu T., Moldrup P. Thermal properties of peaty soils: Effects of liquid-phase impedance factor and shrinkage //Vadose Zone Journal. – 2012. – T. 11. – №. 1.
71. Doerr S. H., Shakesby R. A., Walsh R. P. D. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance //Earth-Science Reviews. – 2000. – T. 51. – №. 1-4. – C. 33-65.
72. Doran J. W., Smith M. S. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients //Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. – 1987. – T. 19. – C. 53-72.
73. Dyukarev E. A., Vyaizya A. A., Kiselev K. V. Differences in temperature regime of mineral and peat soil in Bakchar district of Tomsk region //Environmental dynamics and global climate change. – 2019. – T. 10. – №. 2. – C. 100-109.
74. Fariborz Abbasi, Mathieu Javaux, Marnik Vanclooster, Jan Feyen, Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments // Geoderma 189–190 (2012) 480–490
75. Gasparim E., Ricieri R. P., de Lima Silva S., Dallacort R., Gnoatto E., Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu //Acta Scientiarum. Biological Sciences. – 2005. – T. 27. – №. 1. – C. 107-114.

76. Gerke K. M., Skvortsova E. B., Korost D. V. Tomographic method of studying soil pore space: Current perspectives and results for some Russian soils //Eurasian Soil Science. – 2012. – T. 45. – №. 7. – C. 700-709.
77. Ghader A. Clay-loam soil thermal properties survey //International Journal of Advanced and Applied Sciences. – 2014. – T. 1. – №. 6. – C. 31-36.
78. Ghanbarian B., Daigle H. Thermal conductivity in porous media: Percolation-based effective-medium approximation //Water Resources Research. – 2016. – T. 52. – №. 1. – C. 295-314.
79. Gorbov S. N. et al. Physical properties of soils in Rostov agglomeration //Eurasian Soil Science. – 2016. – T. 49. – №. 8. – C. 898-907.
80. Gostick J. T., Khan Z. A., Tranter T. G., Kok M. D., Agnaou M., Sadeghi M., Jervis R. PoreSpy: A python toolkit for quantitative analysis of porous media images //Journal of Open-Source Software. – 2019. – T. 4. – №. 37. – C. 1296.
81. Gruda N. Growth and quality of vegetables in peat substitute growing media //Humboldt University, Berlin, Germany. PhD Diss. – 2005.
82. Gruda, N. (2012): Sustainable peat alternative growing media, Acta Horticulturae, 927: 973–979
83. Johnson M. J., Lee K. Y., Scow K. M. DNA fingerprinting reveals links among agricultural crops, soil properties, and the composition of soil microbial communities //Geoderma. – 2003. – T. 114. – №. 3-4. – C. 279-303.
84. Joris I., Feyen J. Modelling water flow and seasonal soil moisture dynamics in an alluvial groundwater-fed wetland //Hydrology and Earth System Sciences. – 2003. – T. 7. – №. 1. – C. 57-66.
85. Kool J. B., Parker J. C. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties //Water Resources Research. – 1987. – T. 23. – №. 1. – C. 105-114.
86. Lafleur P. M., Hember R. A., Admiral S. W., Roulet N. T. Annual and seasonal variability in evapotranspiration and water table at a shrub-covered bog in southern Ontario, Canada //Hydrological Processes: An International Journal. – 2005. – T. 19. – №. 18. – C. 3533-3550.

87. Lamorski K., Šimůnek J., Sławiński C., Lamorska J. An estimation of the main wetting branch of the soil water retention curve based on its main drying branch using the machine learning method //Water Resources Research. – 2017. – T. 53. – №. 2. – C. 1539-1552.
88. Likos W. J., Lu N., Godt J. W. Hysteresis and uncertainty in soil water-retention curve parameters //Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2014. – T. 140. – №. 4. – C. 04013050.
89. Mady A. Y., Shein E. Modelling and validation hysteresis in soil water retention curve using tomography of pore structure //International Journal of Water. – 2018. – T. 12. – №. 4. – C. 370-381.
90. Mady A. Y., Shein E. V. Optimizing Pedotransfer Functions for Predicting Soil Moisture of Wetting Curve Based on the Effective Degree of Saturation //Eurasian Soil Science. – 2021. – T. 54. – №. 3. – C. 399-408.
91. Mahdi A., Rattan L., Olson K. R., Fundamentals and Functions of Soil Environment // Soil Health and Intensification of Agroecosystems, 2017 pp. 1-23
92. Maher M., Prasad M., Raviv M. Organic soilless media components //Soilless culture: Theory and practice. – 2008. – C. 459-504.
93. Markoska V., Spalevic V., Lisichkov K., Atkovska K., Gulaboski R. Determination of water retention characteristics of perlite and peat //Agriculture & Forestry/Poljoprivreda i Sumarstvo. – 2018. – T. 64. – №. 3.
94. Moncharoen L. Major characteristics and classification of wet inceptisols and histosols //Wetland Soils: Characterization, Classification, and Utilization: Proceedings of a Workshop Held 26 March to 5 April 1984. – Int. Rice Res. Inst., 1985. – C. 393.
95. Mustamo P., Ronkanen A. K., Berglund Ö., Berglund K., Kløve, B. Thermal conductivity of unfrozen and partially frozen managed peat soils //Soil and Tillage Research. – 2019. – T. 191. – C. 245-255.
96. Neilsen R.P. Climatic constraints and issues of scale controlling regional blames. The role of landscape boundaries in the management and restoration of changing environments. Chapman and Hall, New York. 1991.

97. Neilsen R.P., King G.A., De Velice R.L. et al. Sensitivity of ecological landscapes and regions to global climate change. USEPA Rep. 600/3-89/073. USEPA Environ. Res. Lab., Corvallis, OR. 1989.
98. Nikoosokhan S., Nowamooz H., Chazallon C. Effect of dry density, soil texture and time-spatial variable water content on the soil thermal conductivity // *Geomechanics and Geoengineering*. – 2015. – T. 11. – №. 2. – C. 149-158.
99. Novak M. D., Black T. A. Theoretical determination of the surface energy balance and thermal regimes of bare soils // *Boundary-Layer Meteorology*. – 1985. – T. 33. – №. 4. – C. 313-333.
100. Ochsner T. E., Baker J. M. In situ monitoring of soil thermal properties and heat flux during freezing and thawing // *Soil Science Society of America Journal*. – 2008. – T. 72. – №. 4. – C. 1025-1032.
101. Paavilainen E., Päivänen J. Peatland forestry: ecology and principles. – Springer Science & Business Media, 1995. – T. 111.
102. Penner E. Thermal conductivity of frozen soils // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1970. – T. 7. – №. 3. – C. 982-987.
103. Petrovic A. M., Siebert J. E., Rieke P. E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning [to characterize soil compaction phenomena] // *Journal of the Soil Science Society of America (USA)*. – 1982.
104. Puustjarvi V. Peat and its Use in Horticulture // *Peat and its Use in Horticulture*. – 1977.
105. Rafraf S., Guellouz L., Guiras H., Bouhlila R. Quantification of hysteresis effects on a soil subjected to drying and wetting cycles // *International Agrophysics*. – 2016. – T. 30. – №. 4.
106. Rao T. V. R., Silva B. B., Moreira A. A. Características térmicas do solo em Salvador, BA // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. – 2005. – T. 9. – №. 4. – C. 554-559.
107. Rattan Lal, Manojk.Shuka Principles of soil physics, 2004

108. Renger M., Wessolek G., Schwärzel K., Sauerbrey R., Siewert, C. Aspects of peat conservation and water management //Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2002. – T. 165. – №. 4. – C. 487-493.
109. Rezanezhad F., Price J. S., Quinton W. L., Lennartz B., Milojevic, T., Van Cappellen, P. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists //Chemical Geology. – 2016. – T. 429. – C. 75-84.
110. Romanenko K.A., Rogov V.V., Yudina A.V., K.N. Abrosimov, Skvortsova E.B., Kurchatova A.N. Frozen soils and sediments microstructure x-ray tomography study: methods, approaches, perspectives // Dokuchaev Soil Bull. 2016. 83. P. 103-117. (In Russ.)
111. Romano N., Santini A. Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation approach: Experimental verifications and numerical studies //Water resources research. – 1999. – T. 35. – №. 11. – C. 3343-3359.
112. Schwärzel K., Renger M., Sauerbrey R., Wessolek G. Soil physical characteristics of peat soils //Journal of plant nutrition and soil science. – 2002. – T. 165. – №. 4. – C. 479-486.
113. Schwärzel K., Šimůnek J., van Genuchten M. T., Wessolek, G. Measurement modeling of soil-water dynamics evapotranspiration of drained peatland soils //Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2006. – T. 169. – №. 6. – C. 762-774
114. Shein E. V., Mady A. Y. Hysteresis of the water retention curve: wetting branch simulation based on the drying curve //Moscow University Soil Science Bulletin. – 2018. – T. 73. – №. 3. – C. 124-128.
115. Shein E. V., Skvortsova E. B., Dembovetskii A. V., Abrosimov K. N., Il'In, L. I., Shnyrev N. A. Pore-size distribution in loamy soils: A comparison between microtomographic and capillarimetric determination methods //Eurasian Soil Science. – 2016. – T. 49. – №. 3. – C. 315-325.
116. Šimůnek J. Kohne J. M., Kodesova R. and Sejna M. Simulating non equilibrium movement of water, solutes, and particles using HYDRUS: A review of

- recent applications //Soil Water Res. – 2008. – T. 3. – №. Special Issue 1. – C. 42-51.
117. Simunek J., van Genuchten M. T., Sejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes //Vadose Zone Journal. – 2008. – T. 7. – №. 2. – C. 587-600.
118. Simunek J., K. Huang and M. Th. van Genuchten, The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, California, 164pp., 1998
119. SkyScan CTvox Quick Start Guide: Bruker microCT, 2014. 16 p.
120. SkyScan Morphometric parameters measured by Skyscan CTanalyser software. User Guide: Bruker microCT, 2017. 49 p.
121. SkyScan NRecon User Manual: Bruker micro-CT, 2016. 27 p.
122. SkyScan N. V. SkyScan 1172 Desktop X-ray Microtomograph Instruction Manual //SkyScan: Aartselaar. Belgium. 2005.
123. Sorokina N. V., Shein E. V., Pozdnyakova A. D., Shvarov A. P. Thermophysical properties of lowland Histosols of the Upper Volga woodland (on the example of the Yakhroma river valley) //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – T. 941. – №. 1. – C. 012027.
124. Tarnawski V. R., Leong W. H. A series-parallel model for estimating the thermal conductivity of unsaturated soils //International Journal of Thermophysics. – 2012. – T. 33. – №. 7. – C. 1191-1218.
125. Usowicz B., Lipiec J., Łukowski M., Marczewski W., Usowicz J. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow //Soil and Tillage Research. – 2016. – T. 164. – C. 45-51.
126. Van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils //Soil science society of America journal. – 1980. – T. 44. – №. 5. – C. 892-898.

127. 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
128. Walter B. P., Heimann M., Matthews E. Modeling modern methane emissions from natural wetlands: 1. Model description and results //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2001. – T. 106. – №. D24. – C. 34189-34206.
129. Wisser D. et al. Soil temperature response to 21st century global warming: the role of and some implications for peat carbon in thawing permafrost soils in North America //Earth System Dynamics. – 2011. – T. 2. – №. 1. – C. 121-138.
130. Zhao Y., Si B. Thermal properties of sandy and peat soils under unfrozen and frozen conditions //Soil and Tillage Research. – 2019. – T. 189. – C. 64-72.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные по зависимости температуропроводности от влажности.

| Название торфозема | Глубина, см | Этап иссушения | | Этап насыщения | |
|---|-------------|--|-----------------------|--|-----------------------|
| | | Температуропроводность, см ² /ч | Объемная влажность, % | Температуропроводность, см ² /ч | Объемная влажность, % |
| торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа | 0 - 20 см | 3,00 | 63,28 | 2,70 | 25,45 |
| | | 4,01 | 55,54 | 3,64 | 36,87 |
| | | 4,14 | 49,12 | 4,27 | 41,75 |
| | | 4,16 | 45,77 | 4,63 | 44,99 |
| | | 3,08 | 40,93 | 4,29 | 48,65 |
| | | 2,74 | 37,76 | | |
| | | 2,73 | 31,89 | | |
| | | 2,64 | 24,41 | | |
| | 20 - 40 см | 3,68 | 66,43 | 2,86 | 32,40 |
| | | 3,36 | 56,09 | 3,35 | 50,45 |
| | | 2,93 | 53,15 | 3,32 | 53,76 |
| | | 2,94 | 48,90 | 3,27 | 56,25 |
| | | 2,82 | 46,21 | 3,34 | 64,11 |
| | | 2,83 | 42,96 | | |
| торфоземы агроминеральные | 0 - 20 см | 3,00 | 46,02 | 2,70 | 25,45 |
| | | 4,44 | 45,97 | 3,64 | 36,87 |
| | | 4,78 | 44,61 | 4,27 | 41,75 |
| | | 4,60 | 42,02 | 4,63 | 44,99 |
| | | 4,91 | 39,45 | 4,29 | 48,65 |
| | | 2,92 | 33,12 | | |

| | | | | | | |
|------------|---|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2,46 | 27,41 | | | |
| | | 2,65 | 25,45 | | | |
| | 20 - 40 см | 4,81 | 44,55 | 3,27 | 8,83 | |
| | | 4,88 | 40,73 | 2,77 | 28,10 | |
| | | 4,38 | 32,73 | 4,12 | 31,60 | |
| | | 3,29 | 23,34 | 4,75 | 44,28 | |
| | | 3,07 | 18,62 | 4,63 | 49,68 | |
| | | 2,96 | 13,30 | | | |
| | | 3,27 | 8,83 | | | |
| | Торфоземы на разнотравно гипновом и гипновом торфе | 0 - 20 см | 3,00 | 83,73 | 2,28 | 20,42 |
| | | | 2,77 | 72,28 | 1,61 | 35,30 |
| | | | 2,22 | 68,14 | 1,30 | 44,74 |
| | | | 1,51 | 59,57 | 1,20 | 53,38 |
| | | | 1,49 | 53,54 | 1,26 | 59,35 |
| 1,51 | | | 47,03 | | | |
| 1,62 | | | 33,40 | | | |
| 2,28 | | 20,42 | | | | |
| 20 - 40 см | | 3,48 | 84,47 | 2,11 | 21,66 | |
| | | 3,89 | 69,11 | 1,60 | 29,55 | |
| | 1,90 | 64,13 | 1,46 | 40,51 | | |
| | 1,71 | 57,19 | 2,15 | 47,88 | | |
| | 1,50 | 51,55 | 2,16 | 56,10 | | |
| | 1,57 | 44,18 | | | | |
| | 1,70 | 32,34 | | | | |
| 2,11 | 21,66 | | | | | |

Приложение 2.

Графики зависимости коэффициента угла смачивания от влажности.

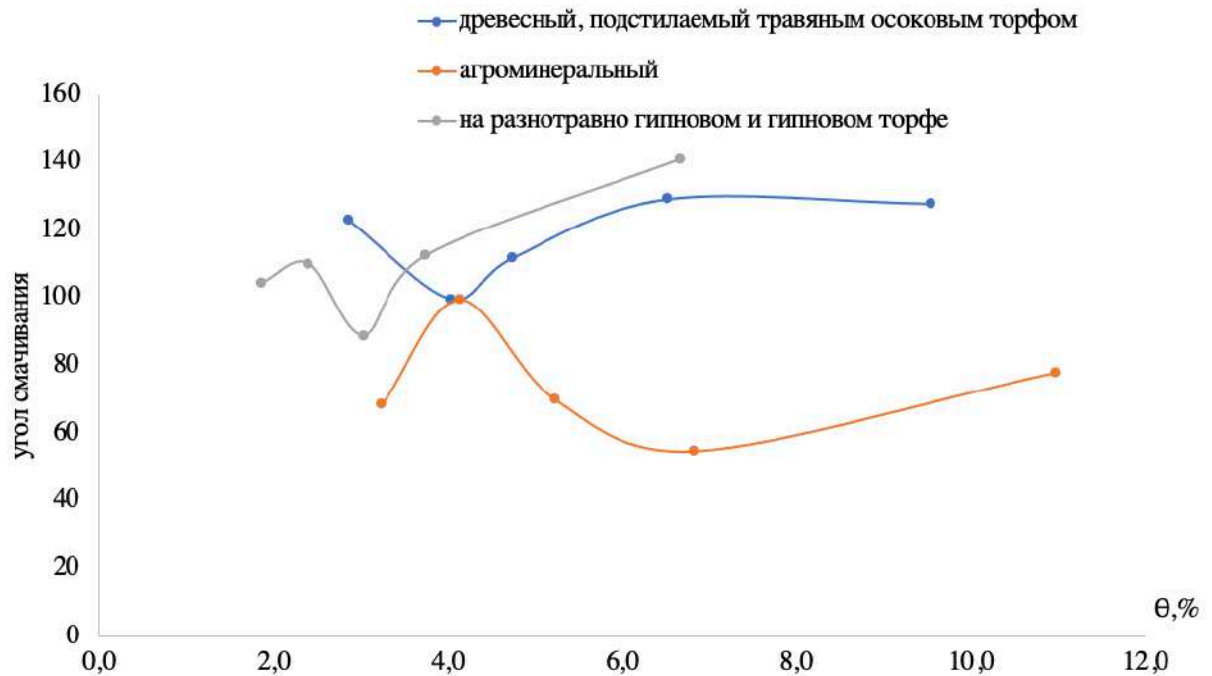


Рисунок 1 – Зависимость угла смачивания различных торфоземов от объемной влажности для глубины 0-20 см



Рисунок 2 – Зависимость угла смачивания различных торфоземов от объемной влажности для глубины 20-40 см

Приложение 3.

Параметры аппроксимации ОГХ торфоземов уравнение ван Гнухтена (van Genuchten, 1980) указанием их достоверности.

*** - достоверно с уровнем значимости 0.001, ** - 0.01, * - 0.05. Без указания звездочки, - не значимо

Таблица 1. Торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа (5-15 см) - рыхлый образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaS | .80355 | .02304 | 34.88*** | .7472 | .8599 |
| Alpha | .43184 | .19462 | 2.22 | -.0443 | .9080 |
| n | 1.13803 | .01464 | 77.72*** | 1.1022 | 1.1739 |

Таблица 2. Торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа (25-40 см) - рыхлый образец.

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .03883 | .20776 | .19 | -.4952 | .5729 |
| ThetaS | .88890 | .01391 | 63.93*** | .8532 | .9246 |
| Alpha | .31387 | .12586 | 2.49* | -.0096 | .6374 |
| n | 1.17711 | .08067 | 14.59*** | .9698 | 1.3845 |

Таблица 3. Торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи (5-15 см) - рыхлый образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .08443 | .23951 | .35 | -.5312 | .7001 |
| ThetaS | .82868 | .02202 | 37.63*** | .7721 | .8853 |
| Alpha | .44355 | .31628 | 1.40 | -.3694 | 1.2565 |
| n | 1.19830 | .13373 | 8.96*** | .8545 | 1.5421 |

Таблица 4. Торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи (5-15 см) - плотный образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .40783 | .05194 | 7.85 *** | .2743 | .5413 |
| ThetaS | .78839 | .01010 | 78.07*** | .7624 | .8143 |
| Alpha | .01688 | .00280 | 6.03*** | .0097 | .0241 |
| n | 1.75834 | .28853 | 6.09*** | 1.0167 | 2.5000 |

Таблица 5. Торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи (25-40 см) - рыхлый образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .17120 | .09626 | 1.78 | -.0762 | .4186 |
| ThetaS | .84901 | .01827 | 46.48*** | .8021 | .8960 |
| Alpha | .45743 | .21545 | 2.12 | -.0964 | 1.0112 |
| n | 1.27662 | .10507 | 12.15*** | 1.0065 | 1.5467 |

Таблица 6. Торфоземы, развитые на мощной древесной торфяной залежи (25-40 см) - плотный образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|-----------|--------|--------|
| ThetaR | .44232 | .06106 | 7.24 *** | .2854 | .5993 |
| ThetaS | .86177 | .00732 | 117.77*** | .8430 | .8806 |
| Alpha | .01381 | .00171 | 8.07*** | .0094 | .0182 |
| n | 1.64259 | .21110 | 7.78*** | 1.1000 | 2.1852 |

Таблица 7. Торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа (5-15 см) - рыхлый образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|--------|------------|----------|-------|-------|
| ThetaR | .27382 | .04836 | 5.66 *** | .1495 | .3981 |

| | | | | | |
|--------|---------|--------|-----------|--------|--------|
| ThetaS | .83959 | .01952 | 43.02 *** | .7894 | .8898 |
| Alpha | .47016 | .24815 | 1.89 | -.1677 | 1.1080 |
| n | 1.42157 | .15081 | 9.43*** | 1.0339 | 1.8092 |

Таблица 8. Торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа (5-15 см) - плотный образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .26803 | .10565 | 2.54* | -.0035 | .5396 |
| ThetaS | .78996 | .01182 | 66.85*** | .7596 | .8203 |
| Alpha | .91773 | .64260 | 1.43 | -.7340 | 2.5695 |
| n | 1.20897 | .10443 | 11.58*** | .9405 | 1.4774 |

Таблица 9. Торфоземы агроминеральные (5-15см) - рыхлый образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .27382 | .04836 | 5.66 *** | 1495 | .3981 |
| ThetaS | .83959 | .01952 | 43.02*** | .7894 | .8898 |
| Alpha | .47016 | .24815 | 1.89 | -.1677 | 1.1080 |
| n | 1.42157 | .15081 | 9.43*** | 1.0339 | 1.8092 |

Таблица 10. Торфоземы агроминеральные (5-15см) - плотный образец

| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|--------------|--------|--------|
| ThetaR | .26803 | .10565 | 2.54 * | -.0035 | .5396 |
| ThetaS | .78996 | .01182 | 66.85 *** | .7596 | .8203 |
| Alpha | .91773 | .64260 | 1.43 | -.7340 | 2.5695 |
| n | 1.20897 | .10443 | 11.58 *** | .9405 | 1.4774 |

Таблица 11. Торфоземы на разнотравно гипновом и гипновом торфе (5-15см)
- рыхлый образец

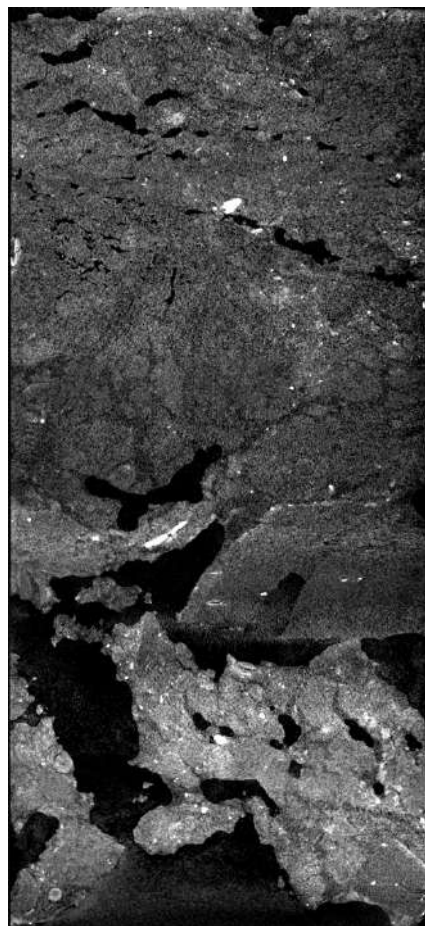
| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .38498 | .03960 | 9.72 *** | .2832 | .4868 |
| ThetaS | .86529 | .02904 | 29.80*** | .7907 | .9399 |
| Alpha | .12751 | .04982 | 2.56* | -.0005 | .2556 |
| n | 1.68465 | .24462 | 6.89*** | 1.0559 | 2.3134 |

Таблица 12. Торфоземы на разнотравно гипновом и гипновом торфе (5-15см)
- рыхлотный

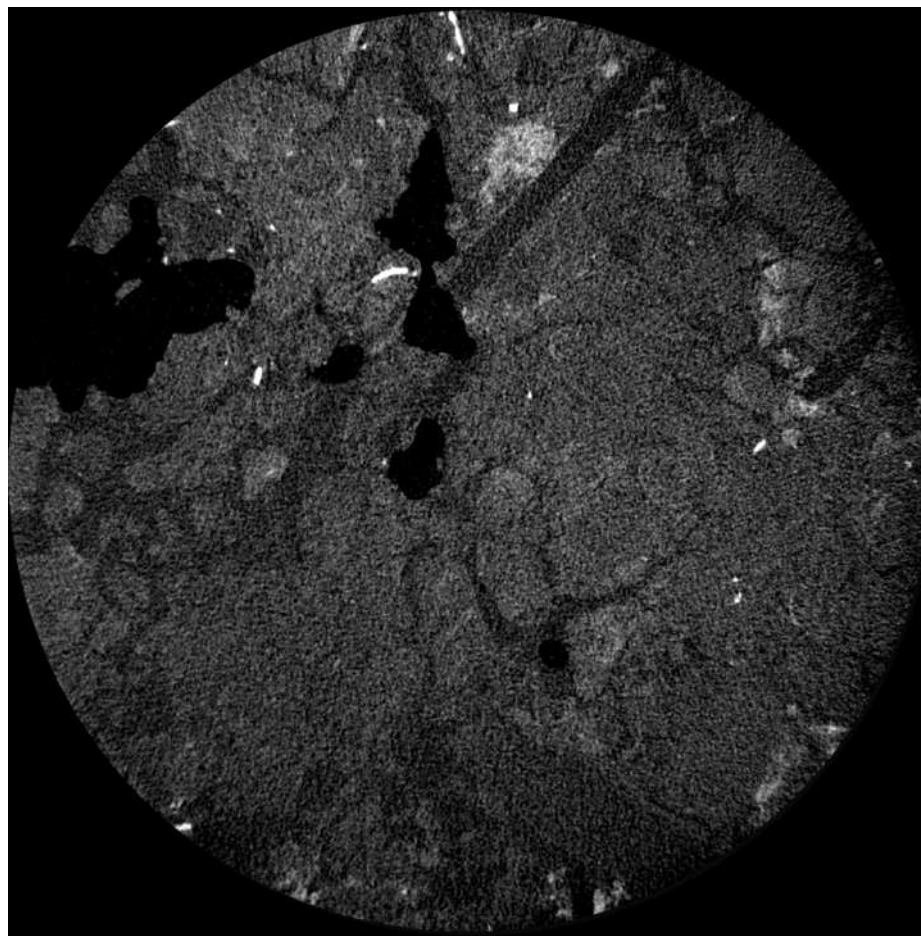
| Variable | Value | S.E.Coeff. | T-Value | Lower | Upper |
|----------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ThetaR | .52139 | .04064 | 12.83*** | .4169 | .6259 |
| ThetaS | .86565 | .01035 | 83.63*** | .8390 | .8923 |
| Alpha | .01474 | .00230 | 6.40*** | .0088 | .0207 |
| n | 1.95625 | .36664 | 5.34*** | 1.0138 | 2.8987 |

Приложение 4.

Горизонтальные и вертикальные томографические срезы торфоземов.

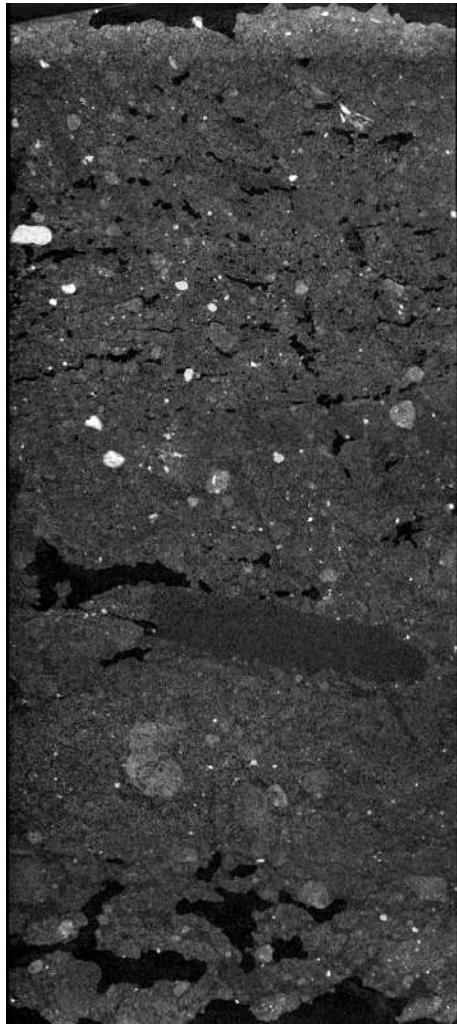


(a)

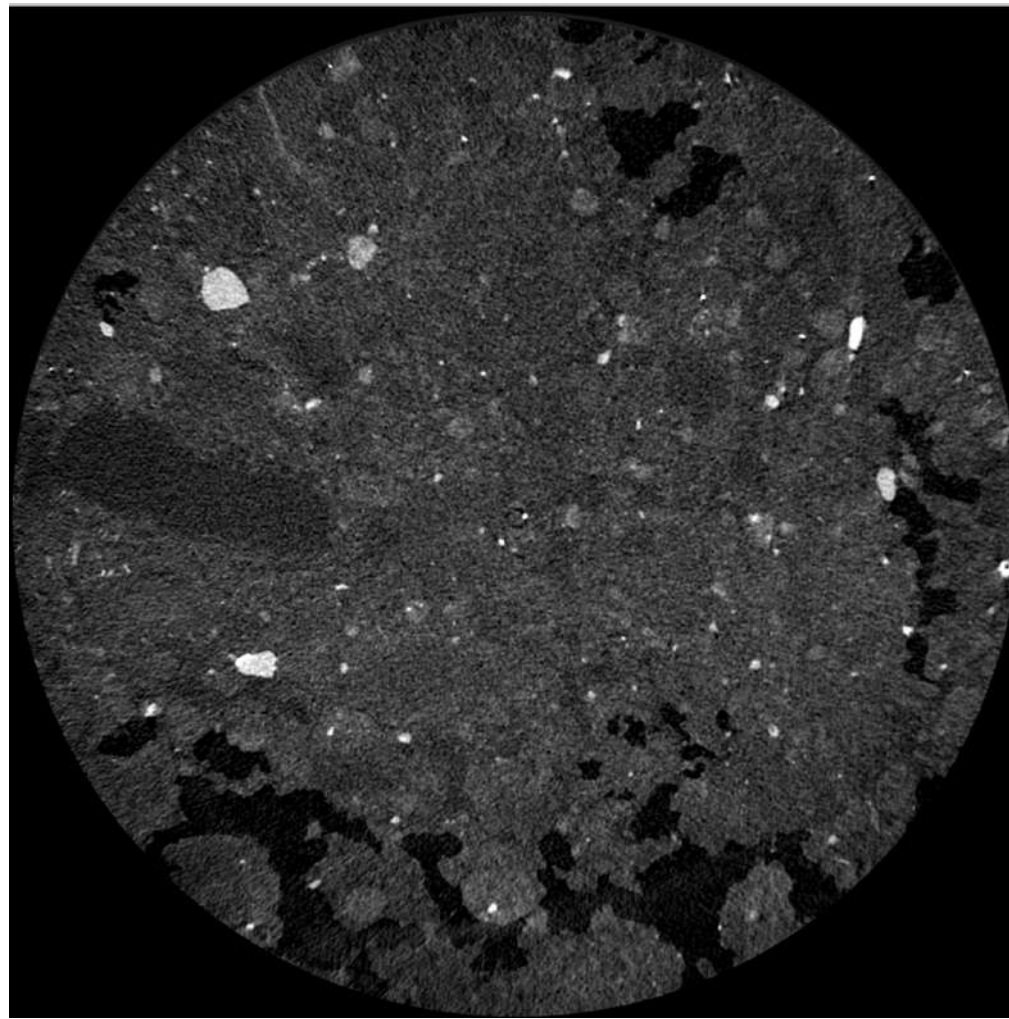


(б)

Рисунок 3 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема древесного, подстилаемый травяным осоковым торфом после насыщения

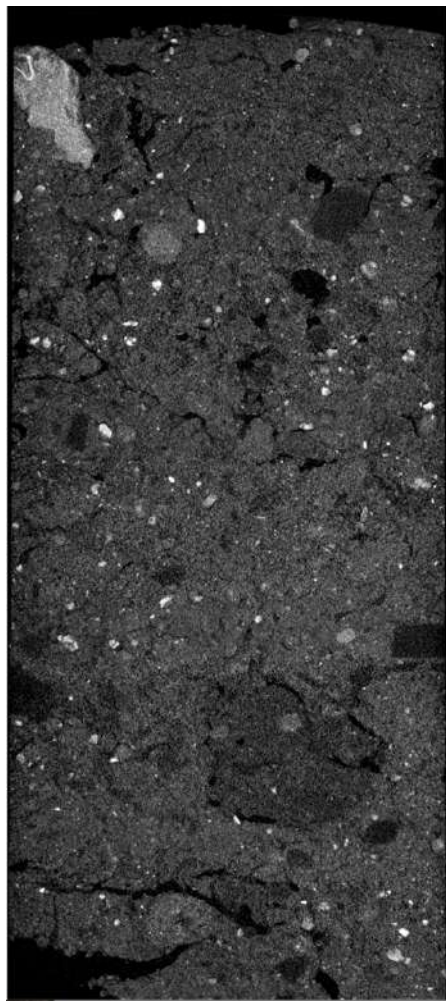


(a)

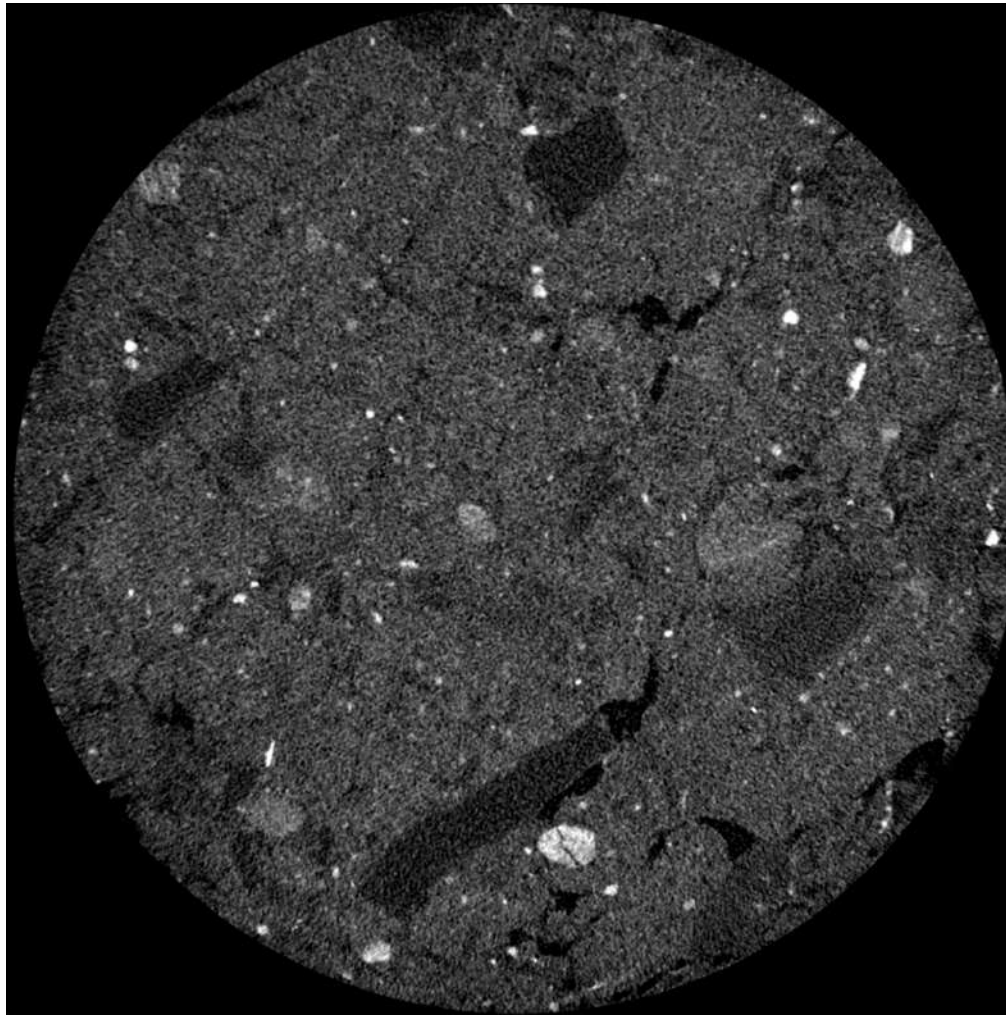


(б)

Рисунок 4 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема на мощной древесной торфяной залежи после насыщения

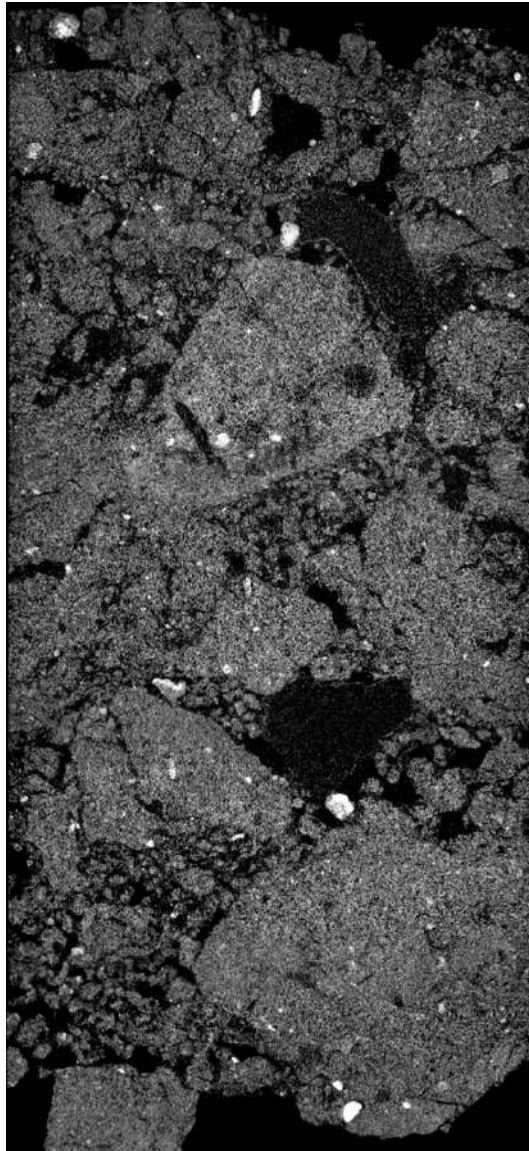


(a)

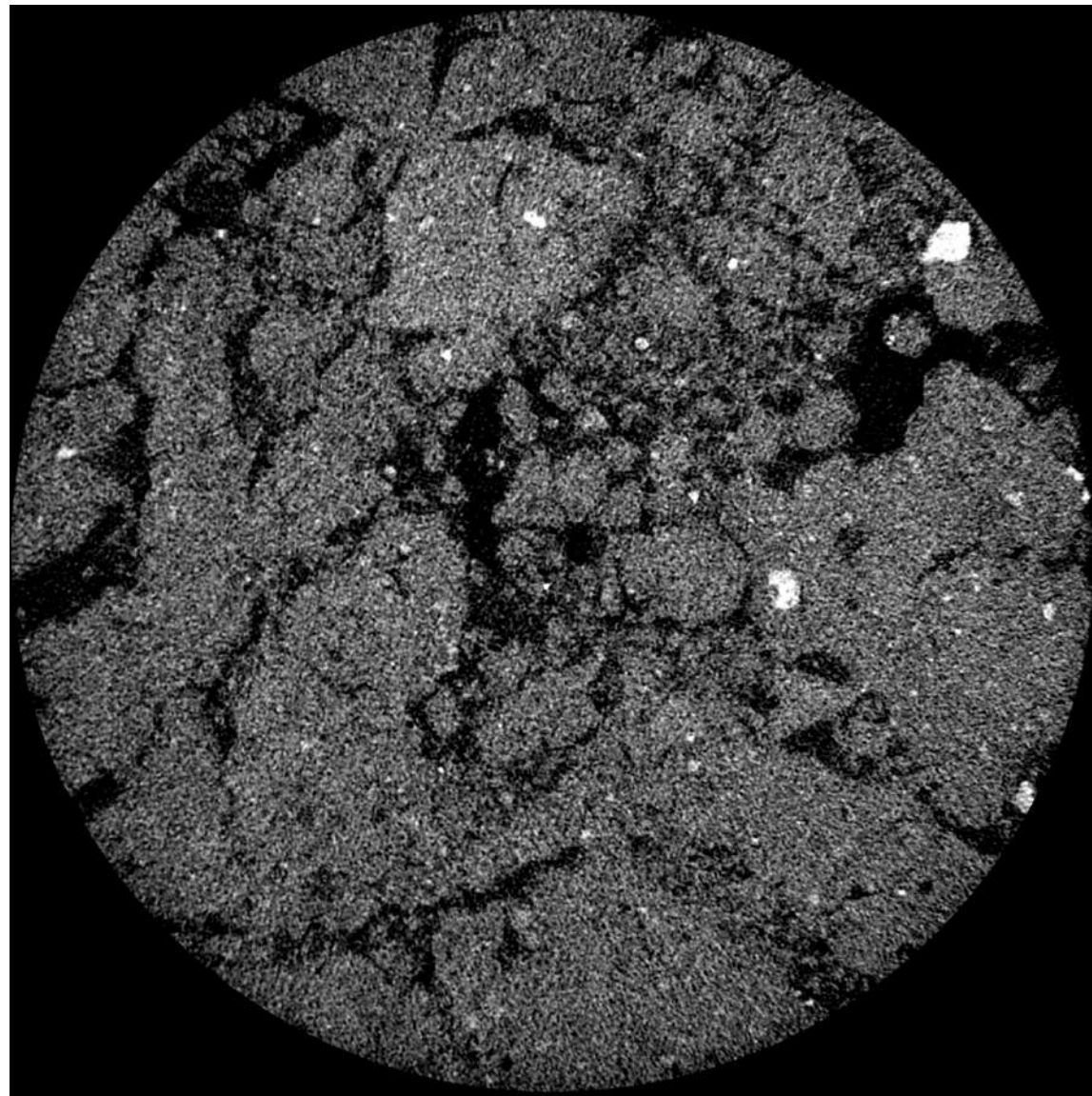


(б)

Рисунок 5 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема древесного, подстилаемый травяным осоковым торфом после насыщения

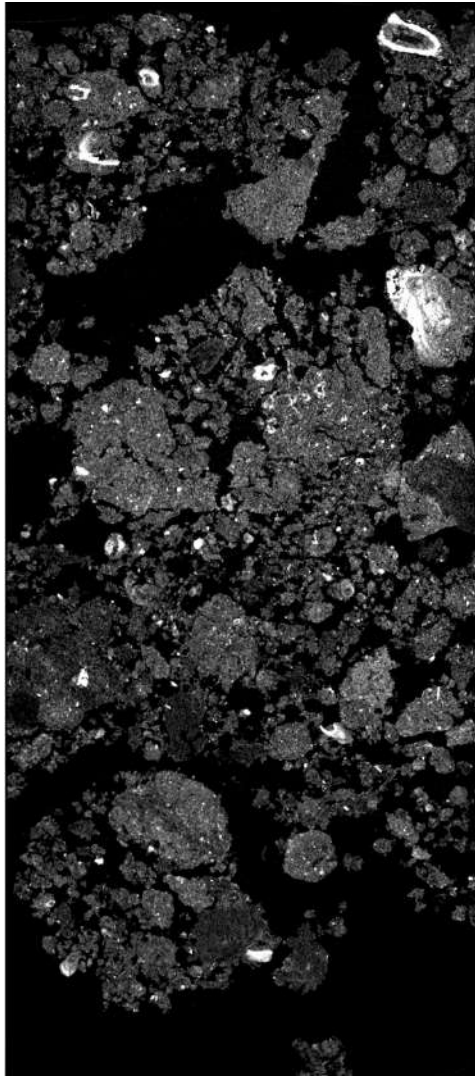


(a)

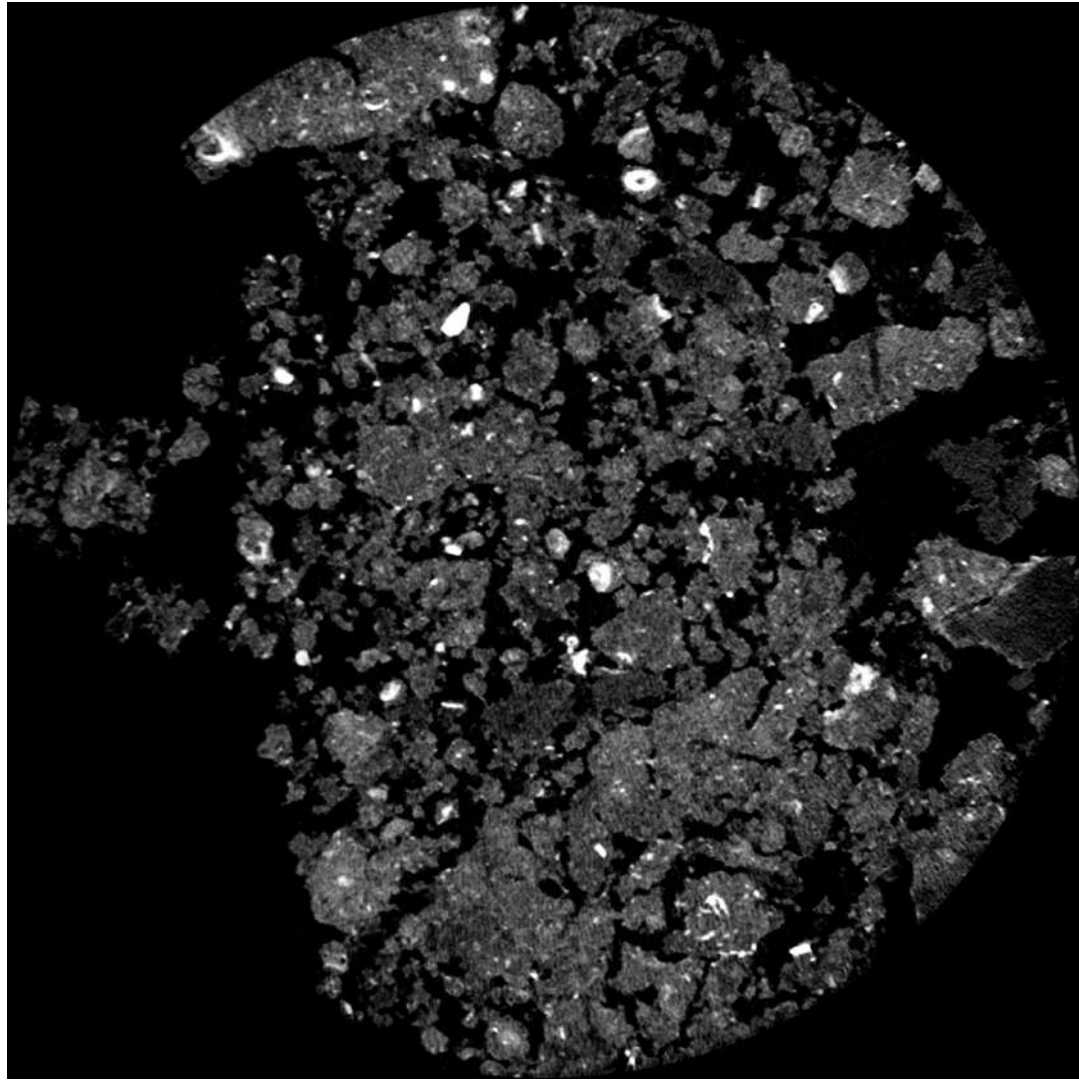


(б)

Рисунок 6 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема агроминерального после насыщения

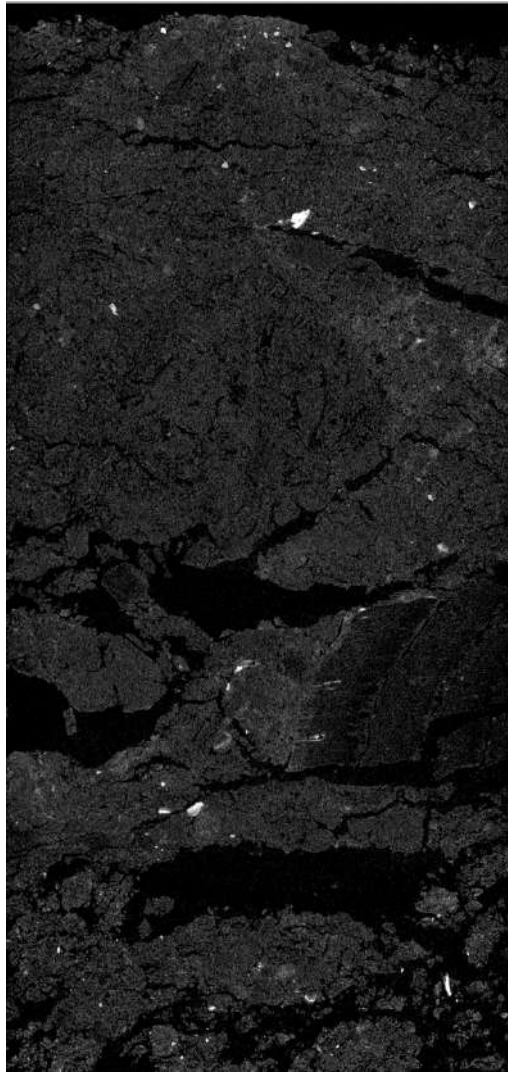


(a)

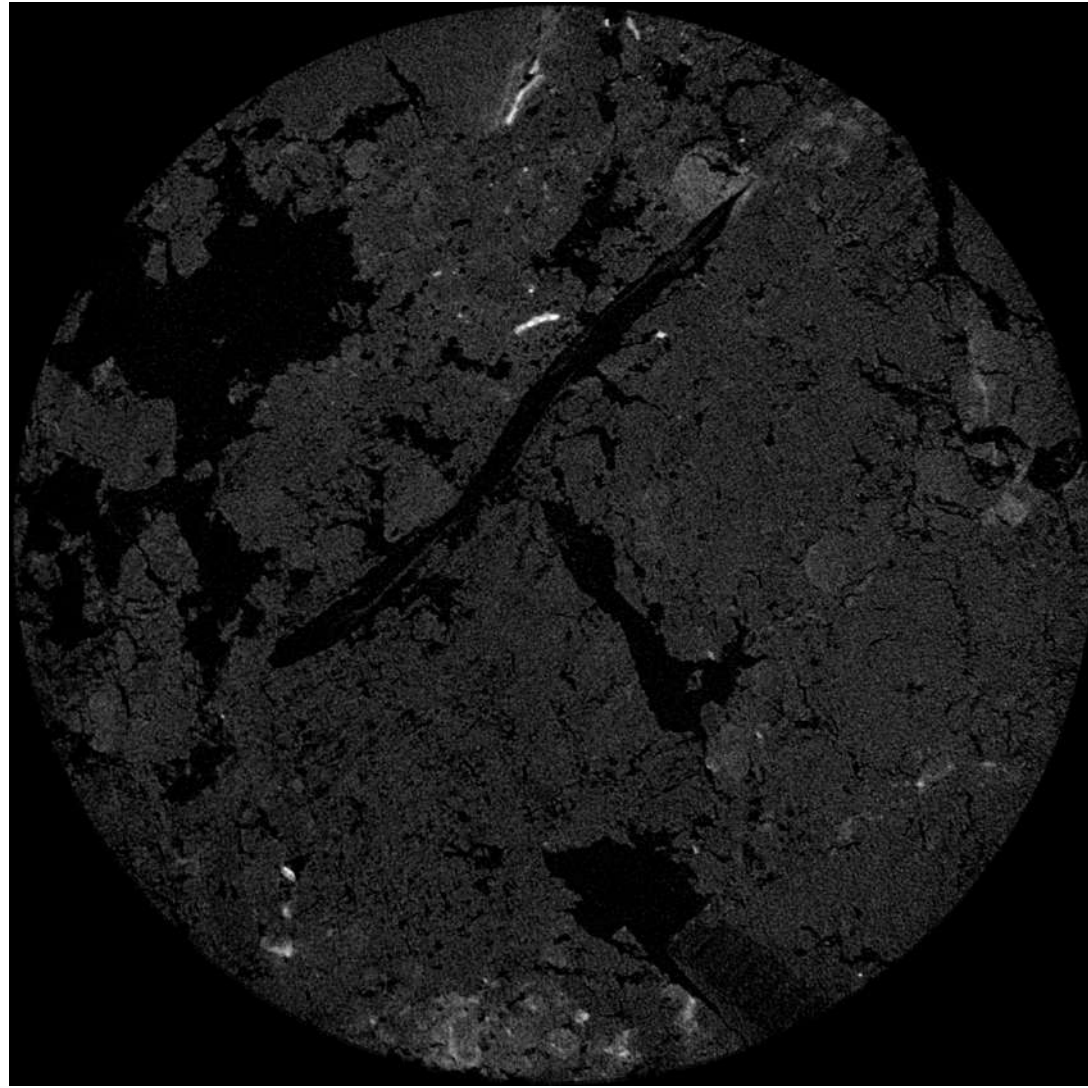


(б)

Рисунок 7 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема гипсового на разнотравно гипсовом и гипсовом торфе после насыщения

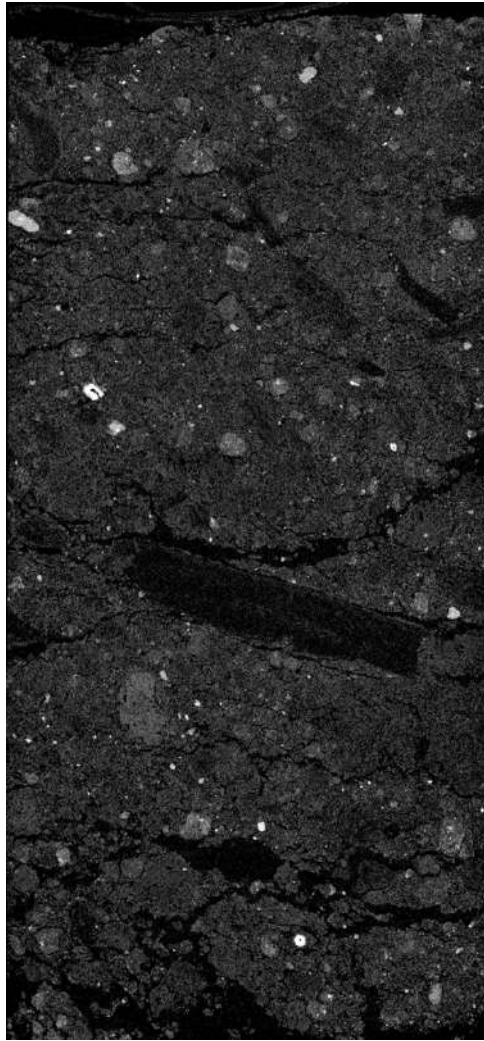


(a).

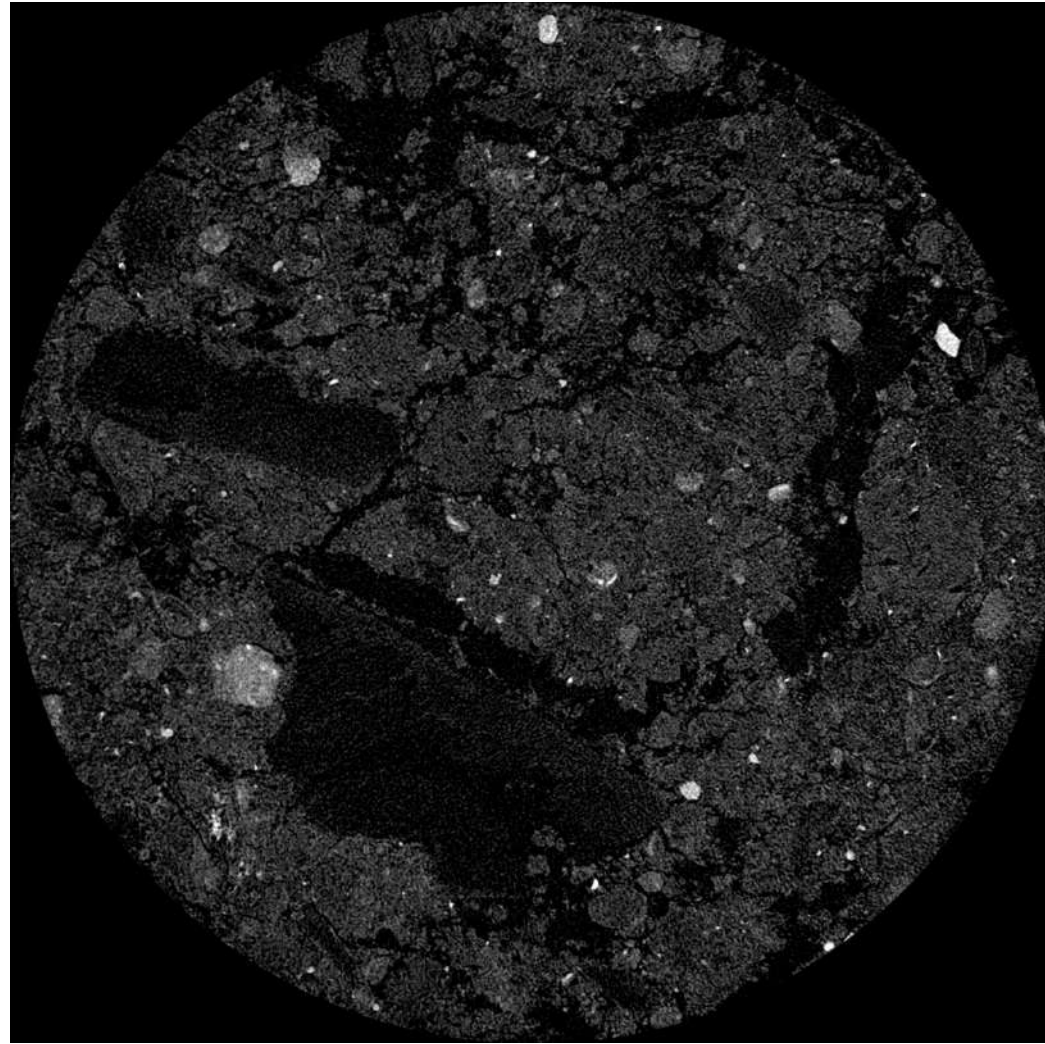


(б)

Рисунок 8 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема древесного, подстилаемый травяным осоковым торфом при естественной влажности

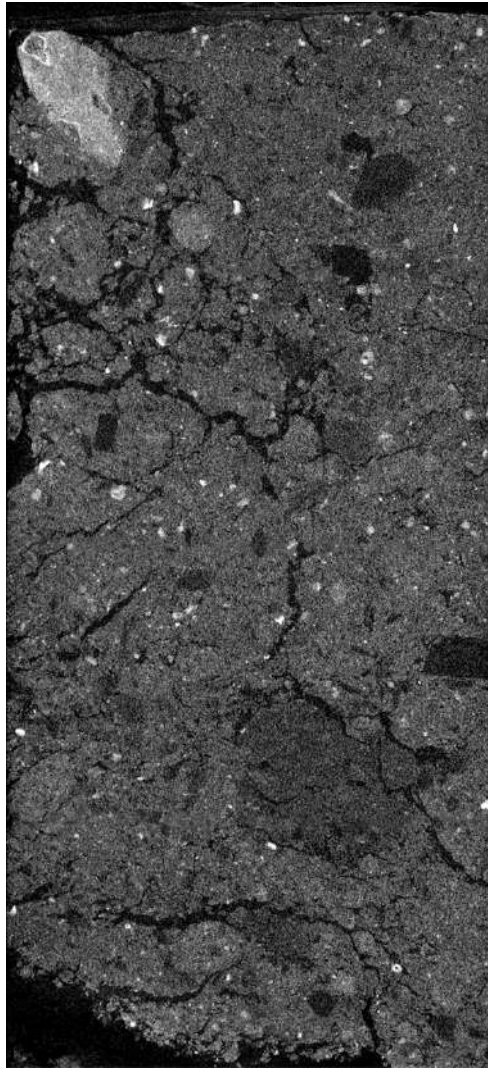


(a).

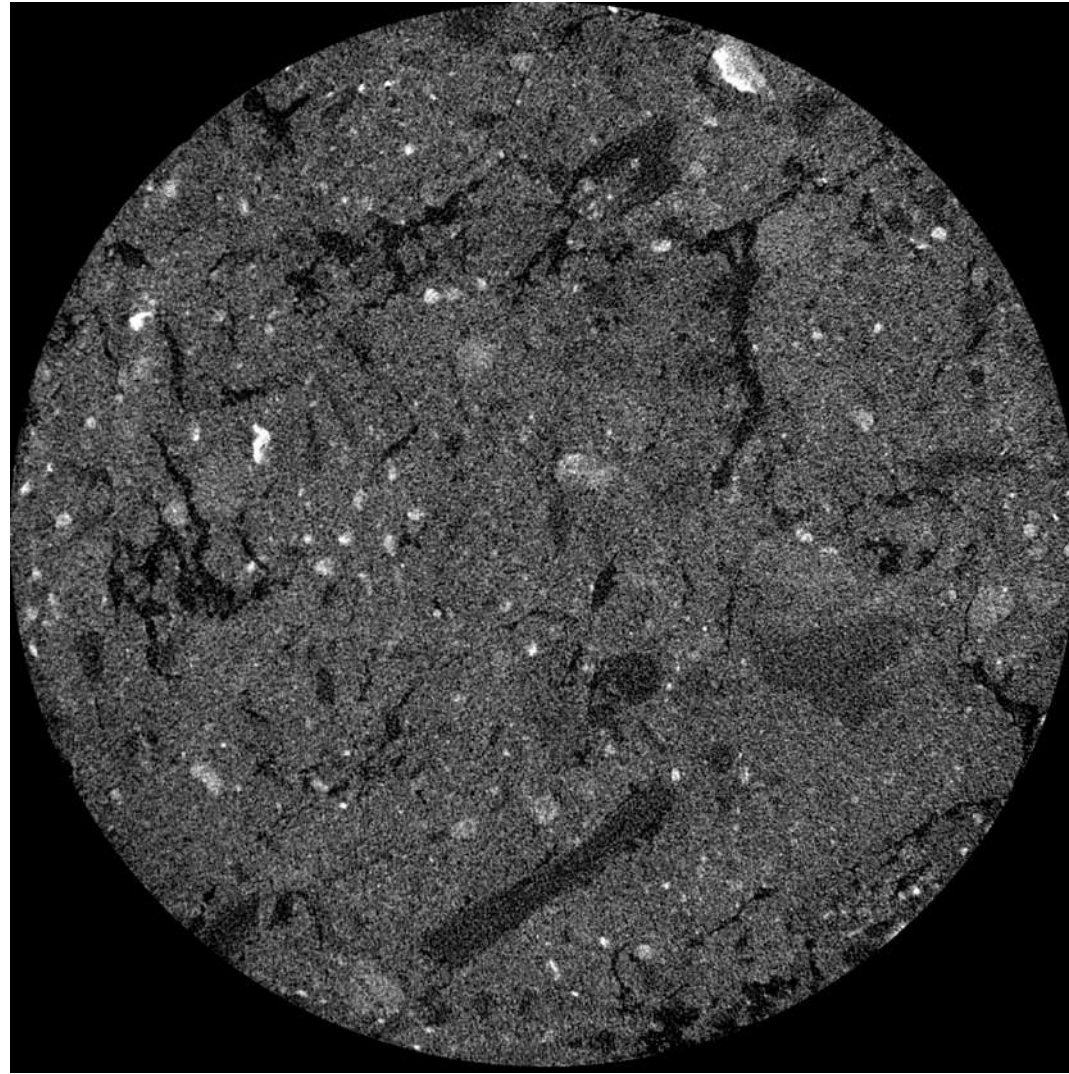


(б)

Рисунок 9 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема на мощной древесной торфяной залежи при естественной влажности

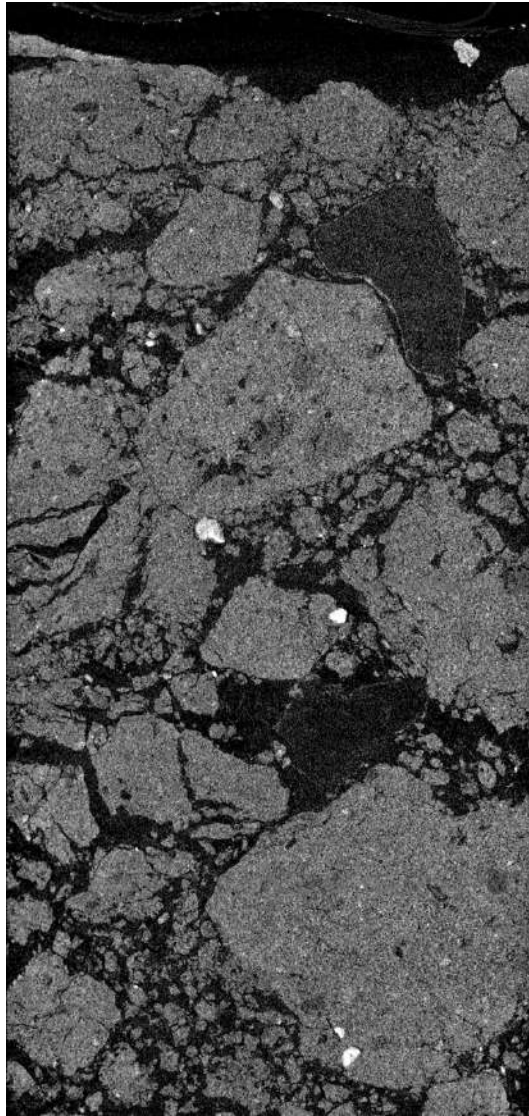


(a)

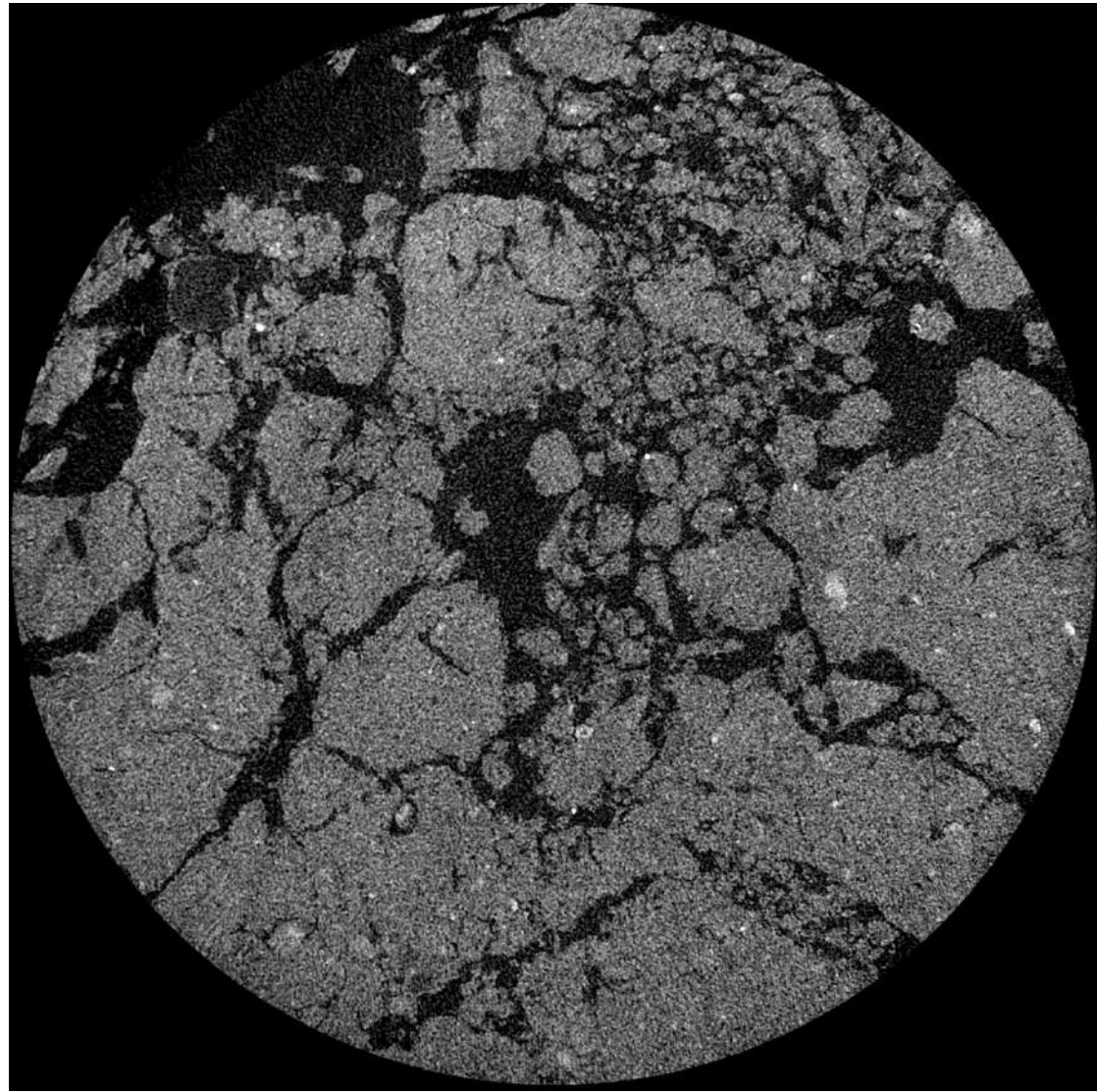


(б)

Рисунок 10 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема древесного, подстилаемый травяным осоковым торфом при естественной влажности

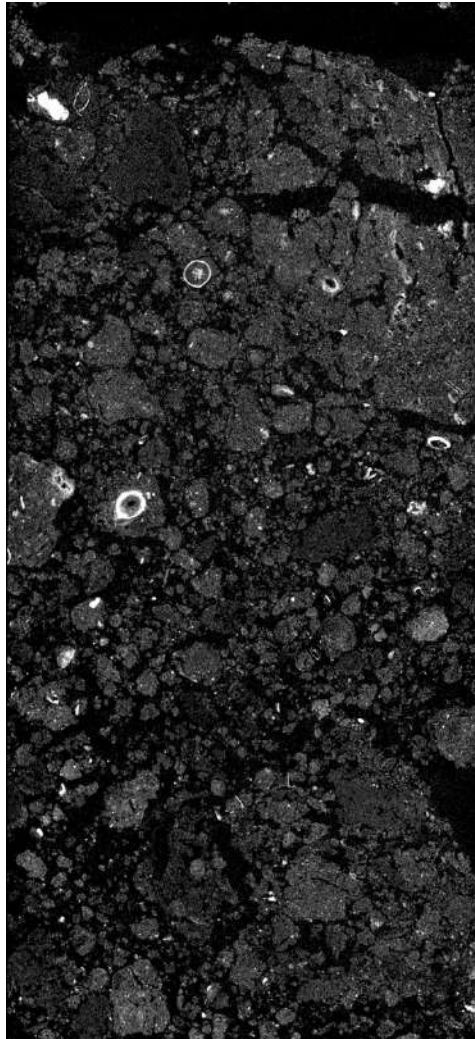


(a)

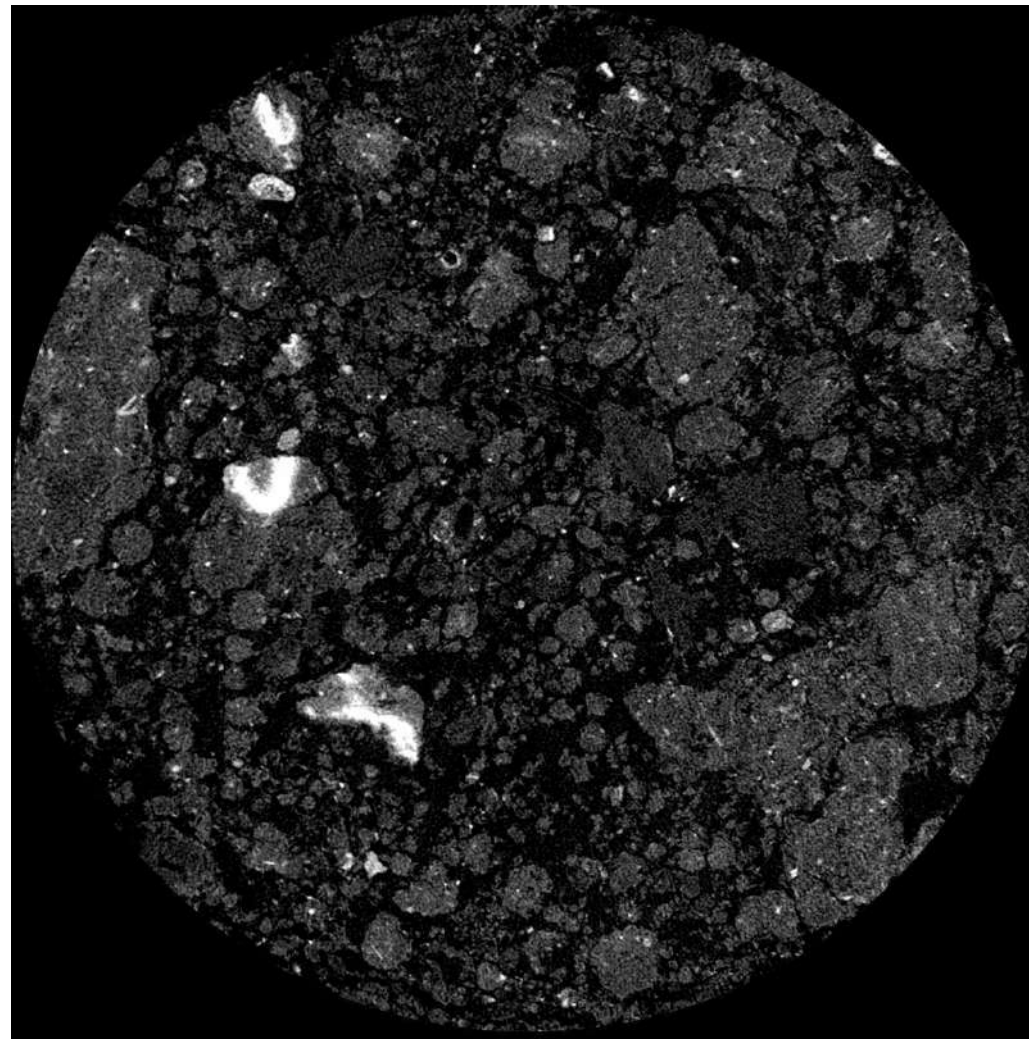


(б)

Рисунок 11- Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема агроминерального при естественной влажности



(a).



(б)

Рисунок 12 - Вертикальный (а) и горизонтальный (б) срез торфозема гипнового на разнотравно гипновом и гипновом торфе при естественной влажности