

На правах рукописи

Честнова Вера Васильевна

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ ТИПИЧНЫХ
КУРСКОЙ ОБЛАСТИ: ВЗАИМОСВЯЗЬ С ФИЗИЧЕСКИМИ
СВОЙСТВАМИ И ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ**

Специальность 06.01.03 – агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва 2017

Работа выполнена на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Хайдапова Долгор Доржиевна**
кандидат биологических наук, доцент кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Харитоновна Галина Владимировна**
доктор биологических наук, заведующая лабораторией экологии почв ФГБУН «Институт водных и экологических проблем ДВО РАН»

Болотов Андрей Геннадьевич
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры метеорологии и климатологии факультета агрономии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева»

Ведущая организация: ФГБНУ Почвенный институт им. В. В. Докучаева

Защита состоится «6» июня 2017г. в .. часов .. минут в аудитории М-2 на заседании диссертационного совета Д 501.002.13 при ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.12, факультет почвоведения МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» и на сайтах <http://soil.msu.ru/nauka/uchenyj-sovet>, <http://istina.msu.ru>.

Автореферат разослан « » апреля 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Костина Наталья Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В условиях изменяющегося климата оценка устойчивости почвенной структуры чрезвычайно актуальная проблема. Реологический подход в оценке почвенной структуры получает в последнее время широкое распространение во всем мире, так как данный подход позволяет количественно характеризовать основное свойство структуры ее прочность.

Реологические свойства почв являются функциональным проявлением поверхностных свойств твердой фазы почв. Эти свойства обусловлены минералогическим составом, дисперсностью почвы, количественным и качественным составом органического вещества и определяют устойчивость, деградацию и формирование почвенной структуры. Тип формирующихся контактов зависит в первую очередь от количества влаги в почве, поэтому сопоставление реологических параметров с основной гидрофизической характеристикой дает более детальное представление о происходящих в почвах процессах. Выявление взаимосвязи реологического поведения почв при разных влажностях с их физическими свойствами и содержанием органического вещества позволяет охарактеризовать прочностные свойства, провести сравнительный анализ и прогнозировать устойчивость исследуемых почв к механической обработке, что является актуальной задачей агрофизики.

Цель работы

Определить реологические свойства черноземов типичных Курской области различного землепользования методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 в широком диапазоне влажностей, установить закономерные связи между реологическими свойствами и содержанием органического вещества, физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой почв.

Задачи исследования

1. Разработать методические особенности определения реологического поведения почвенных паст методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302 (AntonPaar, Austria).

2. Оценить влияние влажности на реологические свойства объектов исследования.

3. Определить диапазоны форм влаги в исследуемых образцах с помощью кривых сушки почвы.

4. Исследовать влияние различных условий землепользования черноземов типичных Курской области на их физические свойства (гранулометрический и агрегатный состав, удельную поверхность) и содержание углерода.

5. Выявить взаимосвязь реологических свойств и основной гидрофизической характеристики.

Научная новизна работы

Впервые исследованы реологические свойства черноземов типичных Курской области методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302 (AntonPaar, Austria). Установлены зависимости между реологическими свойствами и содержанием органического вещества и физическими свойствами, а также показано, что реологические параметры являются количественными показателями структурных свойств почв.

Впервые получены синхронные зависимости температуры и скорости сушки от влажности образца на анализаторе влажности, в результате чего определены диапазоны форм влаги.

Впервые получены реологические характеристики черноземов типичных при различном содержании влаги.

Сопряженный анализ реологических характеристик поведения черноземов разной влажности с основной гидрофизической характеристикой показал взаимозависимость энергетического состояния почв и реологического поведения, что подтверждает единую концепцию Воронина о структуре твердой фазы почв, энергетике воды с основными функциональными и механическими свойствами почв.

Практическая значимость работы

Реологический подход к оценке структуры является рациональным диагностическим методом оценки подверженности почвы к деформационным изменениям.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для прогнозирования устойчивости почв к механическому воздействию, оптимизации агротехнических условий выращивания сельскохозяйственных культур, прогнозе противоэрозионной устойчивости и изменчивости структурного состояния почв.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследования были изложены и обсуждались на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва 2012, 2013), «Докучаевских молодежных чтениях» (Санкт-Петербург, 2013), V Всероссийской научной конференции по лесному почвоведению с международным участием «Разнообразие лесных почв и Биоразнообразие лесов» (Пушино 2013), на IV конференции молодых ученых «Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем» (Москва, 2015), 9th International Soil Science Congress «The Soul of Soil and Civilization» (Antalya, Turkey, 2014), всероссийской конференции с международным участием «Современные методы исследований почв и почвенного покрова» (Москва, 2015) международном конгрессе Евразийской Федерации обществ почвоведов «Почвоведение в Международный год почв 2015» (Сочи, 2015) и на заседаниях кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ (2013-2016).

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах из списка ВАК, 6 статей в сборниках материалов конференций и 4 тезиса докладов.

Защищаемые положения

1. Реологические характеристики чернозема типичного различных землепользований получены методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Австрия). Показано, что метод амплитудной развертки очень информативен при исследовании реологического поведения почв в довольно широком диапазоне влажностей.

2. Полученные реологические характеристики чернозема типичного, находящиеся в различных условиях землепользования показали, что устойчивость почвенной структуры к нагрузкам в значительной степени определяется содержанием органического вещества.

3. Предложено определение некоторых диапазонов содержания форм влаги в исследуемых образцах с помощью кривых сушки почвы при постоянной температуре с синхронной фиксацией температуры и влажности образцов.

4. Установлена взаимозависимость реологических свойств почв с энергетикой почвенной влаги, с уменьшением потенциала почвенной влаги реологическое поведение изменяется от текучего до хрупкого.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 116 страницах, состоит из введения, 3 глав, выводов, списка литературы из 99 источников, в том числе 28 на иностранном языке, содержит 10 таблиц, 28 рисунков и 2 приложения.

Благодарности

Автор искренне благодарит своего научного руководителя Д.Д. Хайдапову за поддержку и всестороннюю помощь на всех этапах работы; сотрудников кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения за содержательное обсуждение работ. Глубокую признательность автор выражает Милановскому Е.Ю., Тюгай З.Н., Початковой Т.Н., Шеину Е.В., Юдиной А.В., за помощь на разных этапах работы.

Глава 1. Обзор литературы

В главе рассмотрены основные понятия о структуре почв. При выделении форм структуры в почвоведении сформировались два подхода, которые принято называть «морфометрическим» и «энергетическим» (Зубкова, Карпачевский, 2001). Наибольшее распространение получил первый, при котором в основу понятия «структура» положены морфометрические особенности агрегатов и их соотношение в почве – размеры, формы, взаиморасположение (Воронин, 1984). При втором подходе понятие структуры основывается на таких понятиях, как характер взаимодействия структурных элементов, оценка сил взаимосвязи и сцепления между частицами, структура порового пространства, что выражается в физико-механических свойствах

почвы. В этом подходе обобщающим свойством почвенной структуры, связанным со всеми ее элементами (состав, размер, форма и характер поверхности почвенных частиц слагающих агрегаты и др.), является механическая прочность и ряд таких реологических свойств почв, как вязкость, упругость, их совместное проявление - вязкоупругое поведение и др. (Воронин, 1984; Зубкова, Карпачевский, 2001).

Реологический подход в оценке устойчивости почвенной структуры получает все большее распространение среди почвоведов (Markgraf и др., 2006; Micheli и др, 2002; Николаева и др. 2007, 2008; Жукова и др, 2015; Pertile и др. 2016; Шеин 2015, Хайдапова и др, 2014, 2015, 2016; и др.).

Проанализированы данные по определению влияния различных свойств почв на реологическое поведение почв. Показана зависимость реологических свойств от содержания почвенной влаги. Применение нового метода амплитудной развертки на реометре MCR-302 позволило получить новые данные о реологическом поведении чернозема типичного различного землепользования в широком диапазоне влажности, что и явилось целью нашей работы.

Глава 2. Объекты и методы исследования

2.1. Объекты исследования

Объектами исследования служили верхние слои (0-10см) черноземов типичных Курской области (по классификации 2004 года: постлитогенные аккумулятивно-гумусовые черноземы и агрочерноземы миграционно-мицелярные карбонатосодержащие среднемощные тяжелосуглинистые на лессовидных суглинках, по классификации WRB (2006г): *Voronic chernozem raschic*), находящиеся в различных условиях землепользования: сельскохозяйственная пашня, прилегающая к ней лесополоса; длительный пар, лесной массив (дубрава), некосимая степь. Пахотное поле и лесополоса, посаженная на старопахотном поле в 1967г, находятся на территории Петринского опорного пункта Почвенного института им. В.В. Докучаева; пар (распахивается дважды в год с 1947г), дубрава и степь – на территории Центрально-черноземного природного биосферного заповедника им. В.А. Алехина.

Для сравнения реологического поведения гумусированных слоев с иллювиальными при разной влажности выбраны нижние слои разрезов исследуемых почв: степь 100-110см, дубрава 195см, лесополоса 160см, пашня 170 см, пар 130-140см.

2.2. Методы исследования

Содержание общего углерода определено методом сухого сжигания на экспресс-анализаторе АН-7529. Гранулометрический анализ проводили методом лазерной дифракции размера частиц на приборе «Analysette 22 comfort» (Germany) с предварительной ультразвуковой диспергацией образца.

Агрегатный анализ проводили методами сухого и мокрого просеивания на вибрационной установке AS 200 control. Набухание определяли методом Васильева с использованием прибора ПНГ. Анализ кривых сушки проводился с помощью анализатора влажности МХ-50 (Япония), в котором реализован принцип термографического анализа (Милановский и др., 2011). Удельную поверхность и верхнюю часть основной гидрофизической характеристики определяли методом десорбции паров воды над насыщенными растворами солей, нижнюю – методом центрифугирования на лабораторной центрифуге типа ЦЛС-3 (Смагин, 2007).

Реологические параметры определяли методом амплитудной развертки в осцилляционном режиме с измерительной системой параллельных плато на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия) Испытания проводили при двух различных условиях:

- 1) заданной толщине образца 3 мм;
- 2) контроле нормальной силы <10 Н.

В первом случае, чтобы достичь заданной толщины образца, прибор давил на образец с неконтролируемой силой во втором случае был выставлен контроль нормальной силы <10 Н. Эксперименты проводили в трехкратной повторности, для обсуждения взяты средние величины.

Технические режимы испытаний были следующие: расстояние между плато $h \sim 2-4$ мм, диаметр плато – 2.5 см, деформация сдвига $\gamma - 0.001-100\%$, угловая частота $f - 0.5$ Гц, количество измеряемых точек 30, температуру образца поддерживали элементами Пельтье на постоянном уровне 20°C .

Поведение почвенных образцов исследовали при разных влажностях: влажности максимального капиллярного водонасыщения, влажности предела текучести и влажности разрыва капилляров.

Почвенные пасты готовились из воздушно-сухих образцов предварительно растертых резиновым пестиком и просеянных через сито 0.25 мм. Для проведения реологических испытаний при влажности максимального набухания образцы капиллярно увлажняли в течение суток. Для испытаний образцов при влажности предела текучести почву доводили до данного состояния добавлением воды и контролировали балансирным конусом Васильева (Вадюнина, Корчагина, 1973.) Полученную пасту помещали в пластмассовую чашку Петри диаметром 3 см и оставляли в эксикаторе с насыщенными парами воды на сутки для структурообразования.

Влажность разрыва капилляров в образце определяли по кривым зависимости температуры и скорости сушки от влажности на анализаторе влажности МХ-50 (Япония) с синхронной регистрацией массы образца и температуры температурным датчиком «Термохрон». Точку перелома температурных кривых и кривых сушки от области с постоянной скоростью сушки (постоянной температуры) к падающей скорости сушки (участок с повышающейся температурой) принимали за область влажности разрыва капилляров (Милановский и др., 2011). Для реологических испытаний образца

при влажности разрыва капилляров устанавливали по времени высушивания образца до перелома кривой, после чего образец аккуратно переносили на плато реометра.

Глава 3. Результаты и обсуждения

3.1. Основные агрофизические свойства почв

3.1.1. Валовое содержание углерода

Различные условия землепользования влияют на содержание органического вещества почв. В связи с этим, было определено валовое содержание углерода объектов исследования (табл. 1). Наибольшим содержанием углерода обладают образцы почв степи, дубравы и лесополосы. В образцах длительного пара и пашни содержание углерода меньше почти в два раза. Меньшее содержание органического вещества в длительном паре и пашне обусловлено усиленной минерализацией органического вещества обрабатываемых почв, в которых изменяется окислительно-восстановительный потенциал почв и гидротермический режим. Ускоренную минерализацию органического вещества пахотных почв отмечали и в других работах (Афанасьева, 1966; Милановский, 2009; Markgraf и др, 2012; Oades, 1984; и др). Однако И.В. Кузнецова (2013) предположила, что скорость процессов разложения органического вещества и разрушения структуры со временем замедляется настолько, что приходит к относительному динамическому равновесию с процессами их новообразования. Незначительное различие между содержанием углерода пашни и длительного пара подтверждает это положение.

Таблица 1.

Содержание углерода, гранулометрический состав и удельная поверхность (С* - Валовое содержание углерода; S** - Удельная поверхность)

Угодье	С*, %	Гранулометрический состав						Содержание физ. глины, %	S**, м ² /г
		Содержание (%) фракций диаметром (мм)							
		<0,001	0,001-0,005	0,005-0,01	0,01-0,05	0,05-0,25	>0,25		
Гумусированные горизонты									
Степь	6,8	5,4	23,0	14,1	51,6	4,9	0,9	42,5	123,4
Дубрава	6,5	9,0	32,3	16,2	41,7	0,7	0,0	57,5	91,2
Лесополоса	5,8	5,8	18,6	12,0	31,8	30,0	1,8	36,4	98,8
Пашня	3,3	8,1	27,9	13,4	31,7	7,5	11,4	49,4	94,1
Пар	3,0	9,7	30,1	13,4	45,9	0,9	0,0	53,2	86,6
Иллювиальные горизонты									
Степь	1,7	8,3	26,5	14,5	50,5	0,2	0,0	49,3	76,8
Дубрава	1,8	5,4	24,1	13,0	54,6	2,9	0,0	42,5	112,9
Лесополоса	2,4	14,2	29,2	19,3	37,0	0,1	0,2	62,7	58,9
Пашня	1,9	12,9	33,9	16,1	36,4	0,6	0,0	63,0	114,0
Пар	2,1	10,9	29,3	16,1	43,8	0,0	0,0	56,2	90,4

Повышенные значения содержания углерода в степи и дубраве свидетельствует о том, что в условиях отсутствия обработки почвы происходит сохранение содержания углерода. В случае с лесополосой, которая выращена на старопахотном поле, повышение содержания органического вещества по сравнению с прилегающей пашней указывает на тот факт, что выращивание лесополос способствует восстановлению органического запаса почв. Слои иллювиальных горизонтов исследуемых объектов характеризуются более низким содержанием углерода.

3.1.2. Гранулометрический состав

Во всех исследованных вариантах преобладающей фракцией является фракция крупной пыли (табл. 1). Максимальное содержание физической глины гумусированных слоев наблюдается в почве под дубравой, минимальное – под лесополосой. Гранулометрический анализ показал, что образцы исследуемого чернозема имеют тяжелосуглинистый (дубрава, пашня, пар) и среднесуглинистый (степь, лесополоса) гранулометрический состав по классификации Н.А. Качинского. По международной классификации образцы относятся к суглинистым и пылевато-суглинистым.

3.1.3. Удельная поверхность

Данные по величине удельной поверхности характеризуют дисперсность почвы, минералогический состав, состав поглощенных катионов, гидрофильность почвенных компонентов (органического вещества, солей и пр.) (Шеин, 2005). Наибольшей удельной поверхностью среди гумусированных горизонтов обладает степная почва (123,4 м²/г), наименьшей – почва пара (86,6 м²/г), почва пашни и лесных участков занимают промежуточное положение (табл. 1). Накопление органического вещества сопровождается увеличением общей удельной поверхности (Yukselen, Kaуа 2006). Минералогический состав черноземов типичных представлен лабильными минералами на 46% и каолинитом с хлоритом на 31% (Соколова и др. 2005).

3.1.4. Агрегатный анализ

По данным сухого просеивания построены графики распределения агрегатов гумусированных горизонтов исследуемых вариантов по размерам (рис. 1).

В образцах степи, дубравы и лесополосы максимальное содержание агрегатов приходится на оптимальный размер 1 - 5 мм и составляет 30 % для почв под древесной растительностью и 28 % для степного чернозема. В варианте степи преобладают агрегаты, размера 1-2 мм, а для образцов дубравы и лесополосы – 2-3 мм и 3-5 мм соответственно. Такое распределение преобладающих размеров агрегатов, вероятно обусловлено различным качественным составом органического вещества.

В пахотных почвах наблюдается увеличение содержания глыбистой и пылевой фракции. Максимальное содержание агрегатов чернозема пашни

имеет размер 0,5-1 мм. По сравнению с почвами, не подвергающимися механической обработке, это значение меньше в 1,5 раза. Содержание глыбистой фракции в пахотной почве больше, чем в почвах под лесной и степной растительностью, а в почве пара является преобладающей фракцией.

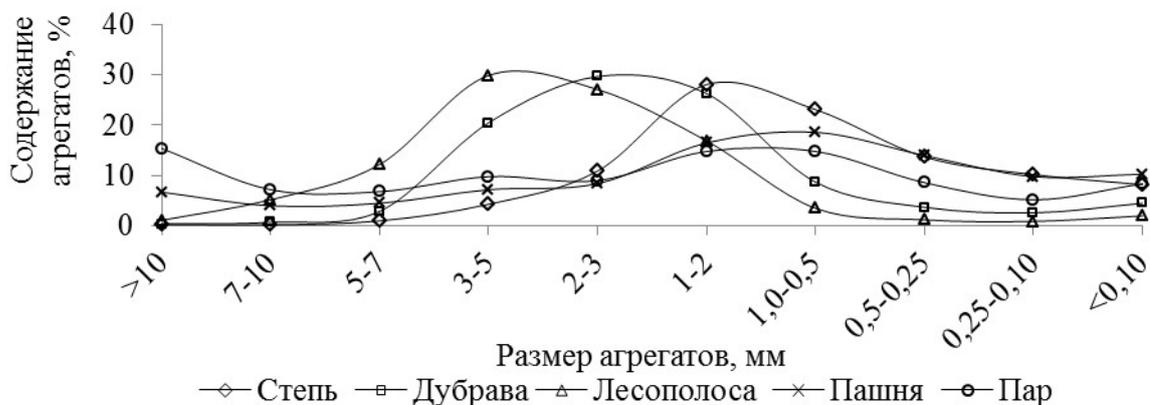


Рис.1. Распределение воздушно-сухих агрегатов по размерам

В связи с вышесказанным можно предположить, что размер агрегатов, преобладающих в исследуемых вариантах, зависит от типа растительности. Для почв под лесными массивами характерны размеры агрегатов 3-5, 2-3 мм, для почв степных фитоценозов – 1-2 мм. Такое распределение, возможно, свидетельствует о различном качественном составе органического вещества, образованного из растительных остатков различных растительных сообществ.

Гистограмма распределения содержания водопрочных макроагрегатов по размерам (рис. 2) наглядно показывает, что в черноземе под лесополосой и дубовым массивом максимальное содержание водопрочных агрегатов размером 1-2 мм, под степью – 0,5-1 мм, в почве пашни и пара – 0,25-0,5 мм. Это указывает на то, что в пахотных почвах содержание водопрочных агрегатов оптимального размера резко уменьшается, что вероятно является признаком деградационных процессов.

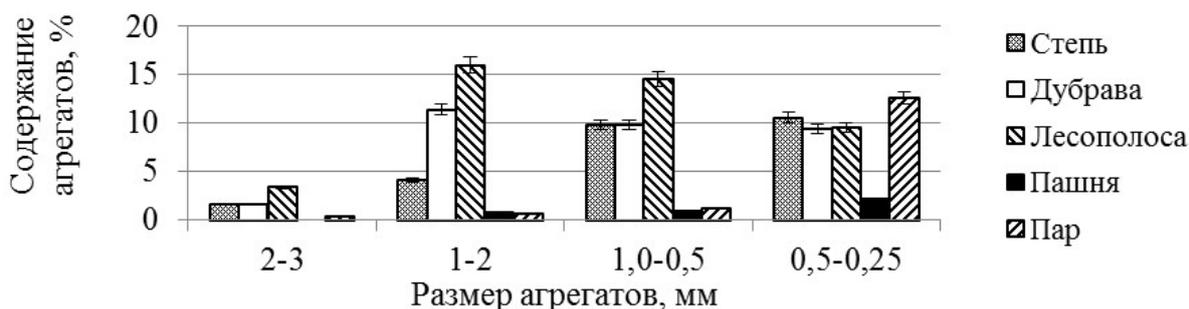


Рис. 2. Распределение водопрочных агрегатов по размерам

3.1.5. Набухание

В результате определения степени набухания установлено, что максимальная величина степени набухания характерна для почвы степи, и убывает в соответствии с рядом: степь-дубрава-лесополоса-пашня-пар (табл. 2).

Таблица 2.

Степень набухания гумусированных горизонтов объектов исследования.

Угодье	Степь	Дубрава	Лесополоса	Пашня	Пар
Степень набухания, %	33,5	30,4	23,2	16,5	17,2

Коэффициент корреляции между набуханием и содержанием углерода составляет 0,95 и свидетельствует о тесной связи этих величин.

3.1.6. Кривые сушки

Полученные экспериментальные кривые сушки по своему виду соответствуют кривым, описанным А.В. Лыковым (1968) (рис.3). По графикам зависимости температуры и скорости сушки от влажности определены критические значения влажности W_{K1} и W_{K2} (Милановский и др., 2011)., которые соответствуют граничным точкам области кривых с постоянной скоростью сушки и неизменной температурой (W_{K1} – смена свободной влаги на капиллярную, W_{K2} – смена капиллярной влаги на пленочную) (табл.3).

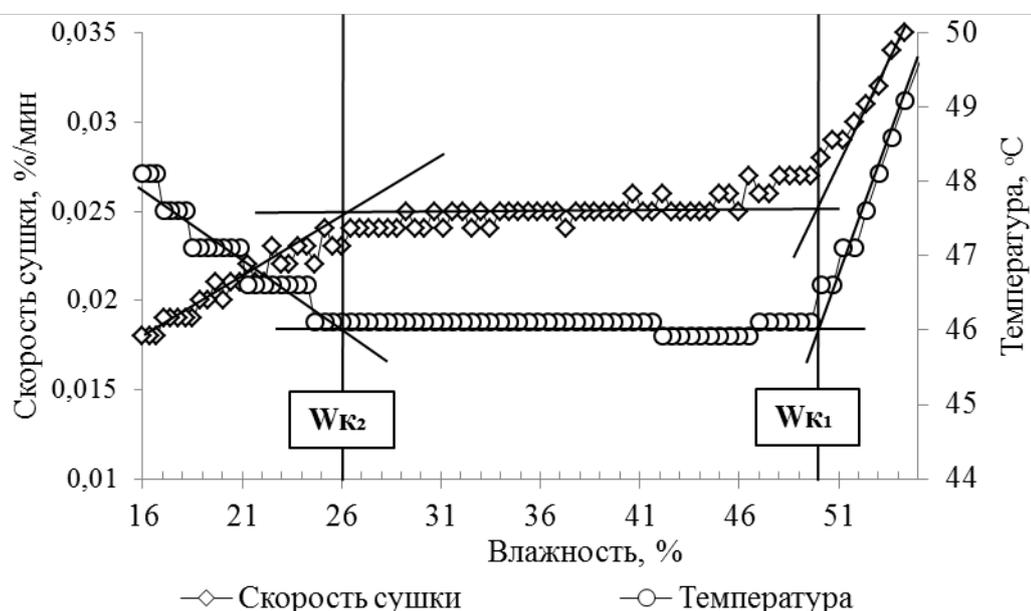


Рис. 3. Температурная кривая и кривая скорости сушки на примере образца лесополосы

Таблица 3.

Значения влажности критических точек на кривых скорости сушки и температуры почвы (W_{K1} – смена свободной влаги на капиллярную, W_{K2} – смена капиллярной влаги на пленочную)

Варианты	$W_{K1}, \%$	$W_{K2}, \%$	$W_{K1} - W_{K2}, \%$
Степь	53	26	27
Дубрава	56	25	30
Лесополоса	50	26	23
Пашня	38	18	19
Пар	38	18	19

В диапазоне постоянной скорости сушки и постоянной температуры, испаряется капиллярная влага (Воронин, 1990). Диапазон капиллярной влаги соответствует значениям от W_{k1} до W_{k2} (%). Наибольшая величина диапазона постоянной скорости сушки вариантов степи, дубравы и лесополосы свидетельствует о большем содержании органического вещества в этих образцах. При переходе от области постоянной скорости сушки к области падающей скорости сушки или от области постоянной температуры к повышению температуры происходит смена формы влаги, влага капиллярная сменяется пленочной, возможно эта область представляет собой влажность разрыва капилляров.

3.1.7. Основная гидрофизическая характеристика

В результате определения основной гидрофизической характеристики получены зависимости капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги от влажности (рис.4). Полученные экспериментальные данные аппроксимированы по уравнению Ван-Генухтена (Van Genuchten и др., 1980 1991), а также методом кусочно-линейной аппроксимации (Никитин, 2016).

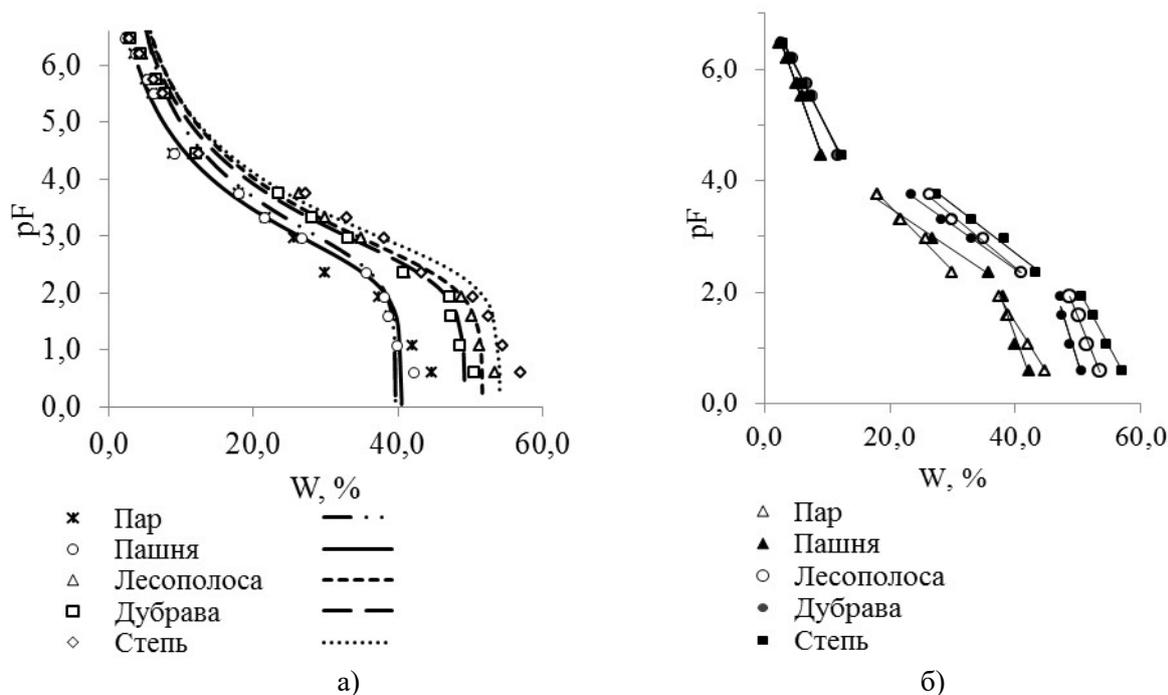


Рис.4. Основная гидрофизическая характеристика гумусированных слоев исследуемых почв: а) аппроксимированная по уравнению Ван Генухтена б) аппроксимированная кусочно-линейным методом

Первый метод аппроксимации в данном случае позволяет исследовать водоудерживающую способность почв во всем диапазоне влажности, второй – изучить более детально отдельные участки, т.к. для всех исследуемых вариантов коэффициент корреляции довольно высок ($>0,92$, а в 80% случаев, близок к 0,99).

Из рисунка 4а видно, что наибольшей водоудерживающей способностью обладают гумусированные слои почв некосимой степи, лесополосы и дубравы меньшей – пахотные почвы.

Линейные функции аппроксимации данных (рис. 4б) разделились также на 2 группы: пахотных почв и почв лесной и степной растительности. Это свидетельствует о меньшей водоудерживающей способности почв сельскохозяйственных угодий. В сорбционной области влаги различия между вариантами в каждой группе минимальные. В диапазонах 0,6-1,9 и 2,4-3,8 рF в каждой группе различия более заметны. Водоудерживающая способность почв по вариантам распределяется следующим образом: пар \approx пашня < дубрава < лесополоса < степь.

3.2. Реологические свойства изучаемых почв

3.2.1. Методические особенностей определения реологических параметров поведения почвенных паст методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302

Во время капиллярного водонасыщения образцы почв впитывали воду и набухали. Наибольшим набуханием отличались образцы с максимальным количеством органического вещества. Величины набухания образцов показаны в таблице 2.

Первым условием проведения испытаний была постоянная толщина образца 3 мм, она же расстояние между двумя плато. Чтобы достичь заданного расстояния, реометр создает усилия нормальной силы к образцу, находящемуся между двумя плато, сжимая его. Наибольшую силу прибору пришлось приложить к образцу некосимой степи – 22Н, чтобы сжать его до толщины 3 мм и далее по убыванию для дубравы – 12Н, для лесополосы 10Н, для пашни - 5Н, для длительного пара – 4Н. Данные величины нормального усилия находятся в тесной корреляции с величинами набухания, коэффициент корреляции составляет 0,92.

Плотность же образцов при одинаковой толщине получилась различная: чем больше набухание или содержание органического вещества, тем большее усилие требуется реометру, чтобы сжать образец до заданной толщины, соответственно, тем больше будет конечная плотность образца и соответственно больше межчастичных контактов и модуль упругости. Таким образом, реологические параметры, определенные при заданной толщине испытуемого образца, заведомо становятся зависимы от плотности, а не от естественно возникших межчастичных взаимодействий в процессе капиллярного увлажнения. Поэтому воспользовались возможностью прибора устанавливать предел воздействия нормальной силы на образец и установили его <10 Н, при этом толщина образца колебалась от 2 до 4 мм. На рис. 5 показаны значения модулей упругости при двух условиях испытаний в области линейной вязкоупругости.

Как видно из рисунка 5, во всех образцах модуль упругости при постоянной толщине образца 3 мм значительно больше модуля упругости при контроле нормальной силы. Вероятно, при контроле толщины образца почвенные частицы во всех образцах подвергаются различной силе сдвливания в зависимости от набухания образца, измеряемые параметры обусловлены, прежде всего, искусственно сформированным межчастичным сцеплением. При контроле нормальной силы толщина образца варьирует, но измеряемые реологические параметры обусловлены естественным межчастичным сцеплением. Поэтому в дальнейшем при изучении естественного межчастичного сцепления анализировали реологическое поведение образцов, определенных при контроле нормальной силы <10 Н.

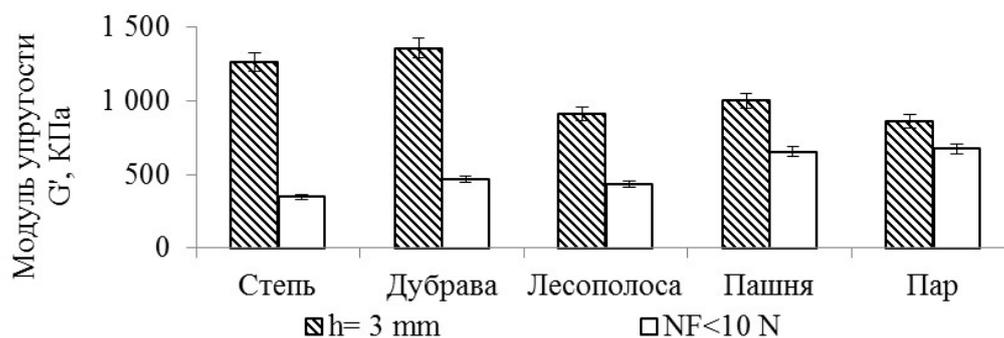


Рис. 5. Значения модулей упругости в диапазоне линейной вязкоупругости при разных условиях проведения испытаний

3.2.2. Реологические свойства исследуемых почв разной влажности

Исследование реологических свойств проводили для образцов влажности максимального набухания, влажности предела текучести и влажности разрыва капилляров (табл. 4).

Таблица 4.

Влажности образцов гумусированных горизонтов

Угодье	Влажность максимального набухания, %	Влажность предела текучести, %	Влажность разрыва капилляров, %
Степь	84	55	23
Дубрава	73	50	25
Лесополоса	75	52	27
Пашня	64	40	18
Пар	57	36	19

В результате реологических испытаний для каждого образца были определены следующие параметры: модуль упругости, диапазон линейной вязкоупругости, точка пересечения модулей упругости и вязкости ($G' = G''$) и величину интегральной зоны Z (рассчитывали с помощью программного обеспечения реометра). Диапазон линейной вязкоупругости – это область упругого поведения. Точка пересечения модулей упругости и вязкости

указывает величину деформации, при которой поведение почвы переходит от пластичного к вязкому. Величина интегральной зоны Z указывает на суммарную величину областей упругого и пластичного поведения, и чем эта величина больше, тем прочнее межчастичные связи и устойчивее структура (Markgraf и др., 2006, Хайдапова и др, 2016).

Прочность межчастичных связей или модуль упругости (рис. 6а) в области линейной вязкоупругости при влажности максимального набухания меньше прочности при влажности предела текучести в 2-3 раза. Очевидно, что при влажности максимального набухания почвенная паста содержит большое количество свободной влаги, поэтому частицы находятся на максимальном расстоянии друг от друга, и межчастичное сцепление слабое. Уменьшение содержания влаги примерно в 1.5 раза (табл. 4) до влажности предела текучести, по-видимому, привело к возникновению капиллярных сил, которые и вызвали упрочнение межчастичного сцепления в 2-3 раза. Высушивание образца влажности предела текучести до влажности разрыва капилляров привело к упрочнению связей в 1-19 раза при уменьшении содержания влаги 2 раза. Наибольшее упрочнение наблюдается в образцах пашни и длительного пара, что вероятно связано с меньшим содержанием органического вещества и почвенные частицы вступают в непосредственный контакт друг с другом, образуя прочные связи. Результаты агрегатного анализа также показали, что в образце пара преобладает глыбистая фракция. Распределение по вариантам землепользования величин модулей упругости в начальный момент при величинах влажности максимального набухания и предела текучести одинаково: наибольшим сцеплением обладают почвенные частицы длительного пара и пашни и далее по убывающей лесополоса, дубрава, некосимая степь. При влажности разрыва капилляров распределение прочности межчастичных связей по убыванию следующее: пар, пашня, степь, дубрава, лесополоса. Однако, при влажности разрыва капилляров разница модулей упругости между вариантами пашня, пар и степь, лесополоса, дубрава резко увеличивается. Межчастичное взаимодействие образцов, богатых органическим веществом меньше, чем в образцах с небольшим содержанием органического вещества. По-видимому, образцы, богатые органическим веществом, поглощают и удерживают больше влаги, которая препятствует установлению близких межчастичных связей, и в то же время выступает в роли смазки, позволяя частицам свободнее двигаться относительно друг друга при большей влажности, а при влажности разрыва капилляров органическое вещество не дает частицам вступать в тесные контакты, в отличие от вариантов пара и пашни, где при маленьком содержании органического вещества наблюдаются высокие величины модуля упругости.

Диапазон линейной вязкоупругости или область вязкоупругого поведения при влажности максимального набухания наибольший в степи и минимальный в образце пара (рис. 6б). При влажности предела текучести исследуемые образцы разделились на две группы: 1) степь, дубрава, лесополоса 2) пашня и

пар. Такое распределение величин диапазона линейной вязкоупругости находится в полном соответствии с распределением органического вещества. При влажности разрыва капилляров область вязкоупругого поведения значительно понижается, при этом минимальный диапазон характерен для вариантов степи, пашни и пара и несколько больше для дубравы и лесополосы. При влажности разрыва капилляров происходит переход пластичного поведения почвы к упруго-хрупкому, уменьшение области вязкоупругого поведения свидетельствует о том, что данная влажность относится к диапазону влажности агрегатообразования.

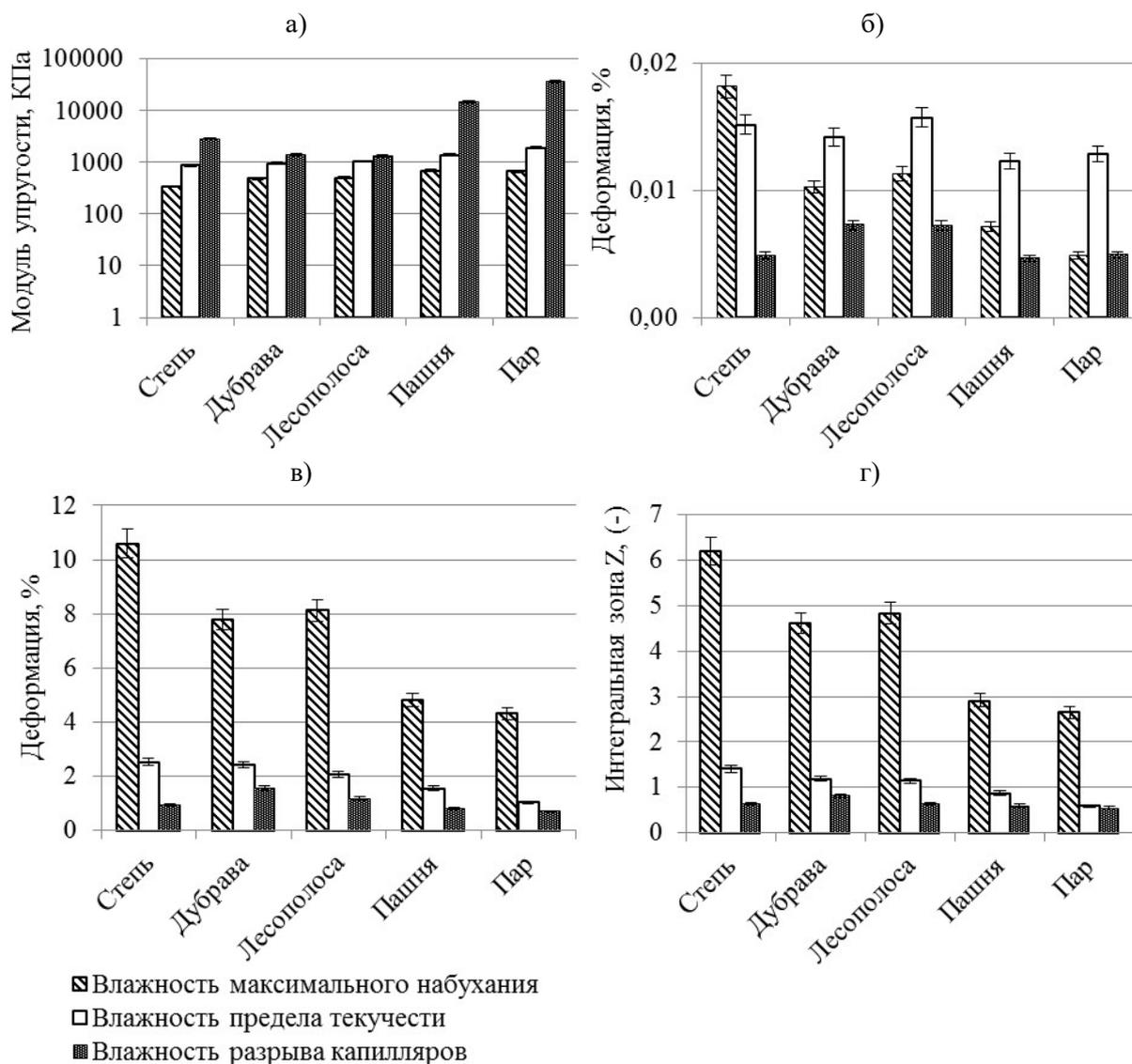


Рис.6. Реологические параметры исследуемых объектов при различных влажностях; а) модуль упругости в диапазоне линейной вязкоупругости; б) диапазон линейной вязкоупругости; в) пересечение модулей упругости и вязкости; г) интегральная зона Z

В точке пересечения модулей упругости и вязкости (рис. 6в) величина деформации (%), при превышении которой почва переходит в вязкое состояние,

в образцах с влажностью максимального набухания значительно больше, чем при влажности предела текучести и влажности разрыва капилляров. При большой влажности поведение почв под нагрузкой более пластично (почвенные частицы имеют большую возможность двигаться относительно друг друга), при меньшей - возникают более прочные межчастичные связи, но реологическое поведение почвенной пасты при этом становится более хрупким, разрушение связей наступает быстрее. Из всех вариантов наибольшей пластичностью или диапазоном вязкоупругой структуры обладают варианты с большим содержанием органического вещества при влажности максимального набухания и предела текучести. При влажности разрыва капилляров наибольшее значение деформации в точке пересечения модулей наблюдается в почве под дубравой, наименьшее – на парующем участке.

Интегральной характеристикой вязкоупругого поведения может служить интегральная зона Z (Markgraf и др. 2006, 2012; Хайдапова и др., 2016), которая соответствует суммарной величине областей упругого и упруговязкого поведения до перехода в область вязкого течения. Чем больше значение интеграла Z , тем больше пластичное состояние почвы.

Как видно из рисунка бг величины интегральной зоны Z при трех уровнях увлажнения сильно различаются. При влажности максимального набухания эта область довольно велика и распределяется по вариантам следующим образом: некосимая степь > дубрава = лесополоса > пашня > длительный пар. При влажности предела текучести зона вязкоупругого поведения меньше в 3-5 раз, а при влажности разрыва капилляров в 5-10 раз. Вероятно, из-за возникших капиллярных связей диапазон смещения почвенных частиц относительно друг друга резко сократился. При этом распределение величин зоны Z для образцов при влажности предела текучести по вариантам полностью соответствует распределению при влажности максимального набухания, и в целом определяется содержанием органического вещества. Однако при влажности разрыва капилляров в почве дубравы интегральная зона наибольшая, а наименьшая в пару. Качественный состав органического вещества дубравы возможно, увеличивает устойчивость почвенной структуры к нагрузкам. В целом, можно заключить, что органическое вещество способствует увеличению диапазона вязкоупругого поведения почв.

3.2.3. Сравнение реологических свойств гумусированных и иллювиальных горизонтов

Для оценки влияния органического вещества на прочность межчастичных связей и пластичность образцов в иллювиальных горизонтах определены модули упругости в диапазоне линейной вязкоупругости и интеграл Z (рис. 7). Реологические испытания проводились при разных влажностях: максимального набухания, предела текучести и влажности разрыва капилляров (табл. 5).

Влажности образцов иллювиальных горизонтов при каждом уровне влажности достаточно равномерны в отличие от гумусированных.

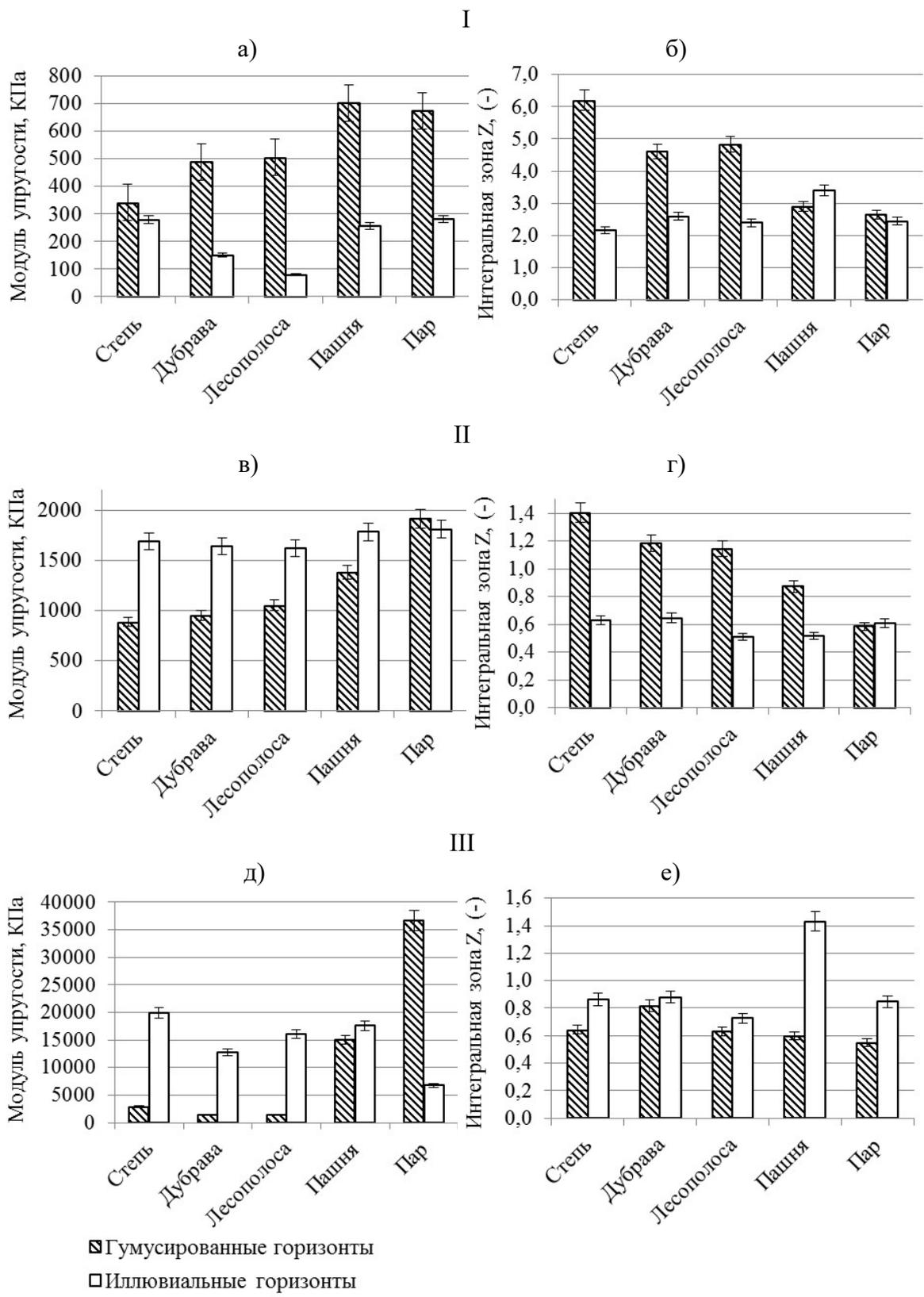


Рис.7. Величины модулей упругости (а, в, д) и интеграла Z (б, г, е) гумусированных и иллювиальных горизонтов I) при влажности максимального набухания II) при влажности предела текучести III) при влажности разрыва капилляров

Сравнение модулей упругости иллювиальных и гумусированных образцов черноземов (рис. 7: Ia, Ib, IIIд) показало, что величины модуля упругости для иллювиальных почв меньше при влажности максимального набухания, и больше при влажности предела текучести и влажности разрыва капилляров. В последних двух случаях исключение составляет почва пара, что вероятно связано с наличием артефактов (возможно при малых влажностях произошло образование трещин в иллювиальных горизонтах).

Таблица 5.

Влажности почвенных паст образцов иллювиальных горизонтов

Угодье	Влажность максимального набухания, %	Влажность предела текучести, %	Влажность разрыва капилляров, %
Степь	64	44	12
Дубрава	53	36	12
Лесополоса	62	39	16
Пашня	59	41	17
Пар	56	38	14

Пластичное поведение исследуемых почв оценивается величиной интеграла Z . Это значение наибольшее при влажности максимального набухания (рис. 7: Ib, IIг, IIIе). Сравнение исследуемых вариантов при данной влажности показало, что в образцах с высоким валовым содержанием углерода (степь, дубрава, лесополоса) значения интеграла Z выше, чем в негумусированных горизонтах этих вариантов (рис.7 Ib). Такие различия вызваны большим количеством органического вещества, которое сильно набухает и препятствует разрушению связей почвенной структуры.

В случае пахотных почв разница между пластичностью иллювиальных и гумусированных горизонтов почв небольшая, вероятно из-за пониженного содержания органического вещества. В этом случае меньшую роль играет органическое вещество, большую – дисперсность почв и соответственно их удельная поверхность.

При влажности предела текучести значения интеграла Z больше для гумусированных горизонтов, чем для иллювиальных (рис. 7 IIг). Исключение составляет эта величина для обоих горизонтов варианта пара, однако разница между ними незначительная.

При влажности разрыва капилляров величина интеграла Z (рис. 7 III е) гумусированных и иллювиальных горизонтов становится приблизительно одинаковой в образцах степи, дубравы и лесополосы, а в образцах пашни и пара область упругопластичного поведения иллювиальных горизонтов становится даже больше, чем гумусированных, то есть при меньшей влажности наличие органического вещества способствует хрупкому поведению, образуя агрегаты более мелкого размера. В иллювиальных горизонтах величина упругопластичного поведения обусловлена большей прочностью связей или

большим модулем упругости, что возможно является причиной образования глыбистой структуры.

3.3. Взаимосвязь реологических параметров с основной гидрофизической характеристикой (на примере гумусированных горизонтов)

Реологические испытания проводились при трех значениях влажности (табл. 4). Влажность максимального набухания по кривым основной гидрофизической характеристики соответствует давлению почвенной влаги, близкому к 0. При давлении 0 влага заполнила все поры почвенного образца. По данным А.Д. Воронина (1990) влажность предела текучести соответствует V критическому потенциалу почвенной влаги или $pF = 2.17$. При этом значении влажность образцов приблизительно соответствует границе между свободным состоянием влаги и началом действия капиллярных сил. На температурной кривой сушки определена влажность разрыва капилляров по перегибу кривой от области постоянной температуры к повышающейся (табл. 4, $W_{к2}$). По данному значению влажности графически по основной гидрофизической характеристике определили значение pF (рис.8).

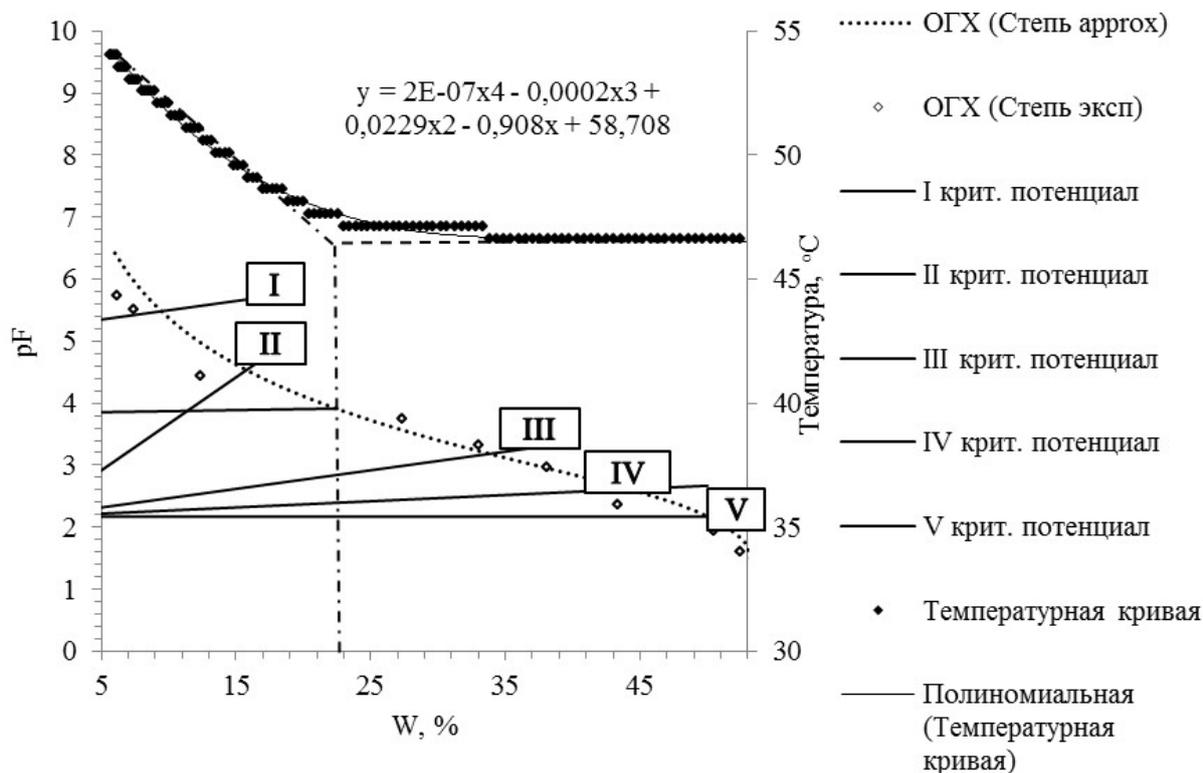


Рис.8. Основная гидрофизическая характеристика и температурная кривая для гумусированного образца степи.

На график основной гидрофизической характеристики (аппроксимированной уравнением Ван-Генухтена) нанесли значения влажностей почвенных паст, при которых проводили реологические испытания (рис.9.) Таким же образом эти значения влажностей нанесли на основную

гидрофизическую характеристику, аппроксимированную кусочно-линейным методом (рис. 10).

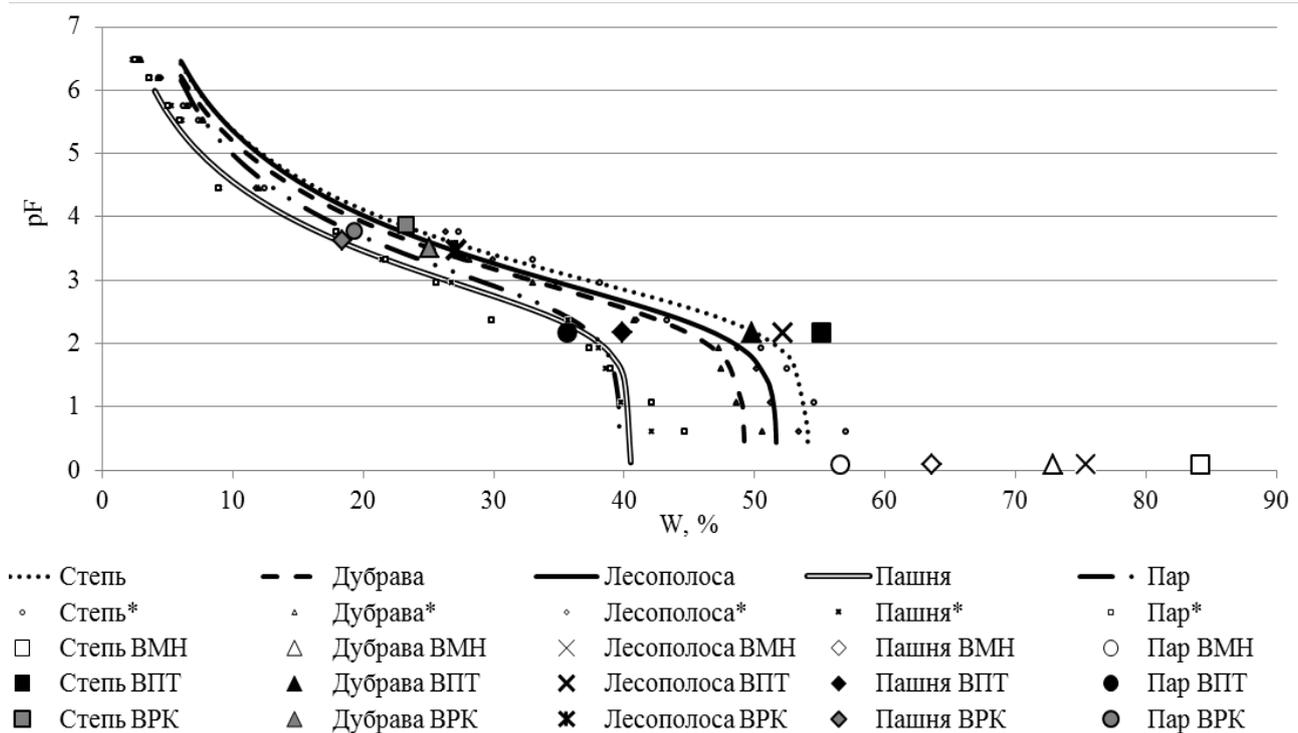


Рис.9. ОГХ и влажности проведения реологических испытаний для гумусированных горизонтов (*-экспериментальные значения основной гидрофизической характеристики, VMH – влажность максимального набухания, VPT – влажность предела текучести, ВРК – влажность разрыва капилляров)

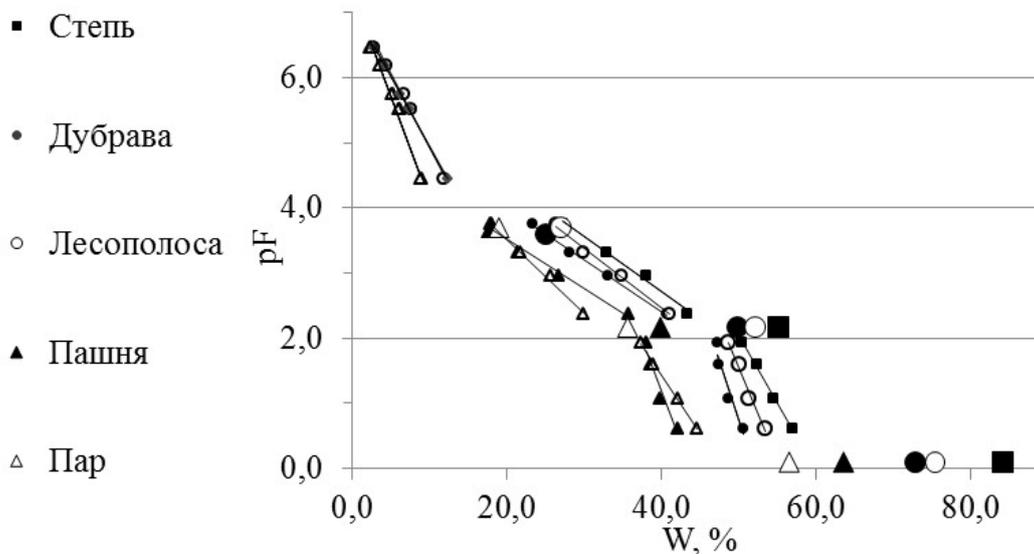


Рис.10. Основная гидрофизическая характеристика гумусированных слоев исследуемых почв (аппроксимация кусочно-линейным методом) и влажности проведения реологических испытаний (■ – степь, ○ – дубрава, ● – лесополоса, ▲ -пашня, △ - пар)

В первом случае при влажности разрыва капилляров удалось определить потенциалы почвенной влаги для всех вариантов, а в случае линеаризированной функции имеются диапазоны, в области которых нет возможности определения rF . Такое, например, происходит в случае определения rF для образца степи при влажности разрыва капилляров. Поэтому в дальнейшем для сопоставления значений реологических параметров и потенциалов почвенной влаги воспользуемся значениями rF , полученными при помощи основных гидрофизических характеристик, аппроксимированных по уравнению Ван-Генухтена.

Для всех образцов значение rF , соответствующее влажности разрыва капилляров, равно $3,7 \pm 0,2$ и на кривой основной гидрофизической характеристики находится между II и III критическим потенциалом по Воронину (1990).

Для установления взаимозависимости реологических характеристик и давления почвенной влаги были построены зависимости значений модуля упругости от rF (рис.11). При потенциале почвенной влаги близком к нулю прочность межчастичных связей имеет минимальное значение, т.к. большое количество содержащейся влаги не дает почвенным частицам вступать в тесное взаимодействие.

При rF , равном 2,17 сила взаимодействия возрастает в 2-3 раза, потому что начинают усиливаться капиллярные силы. При $rF = 3,7$ межчастичное взаимодействие увеличивается приблизительно в 3-50 раз, при данном потенциале капиллярные силы резко увеличиваются за счет увеличения кривизны менисков и свойств поверхности.

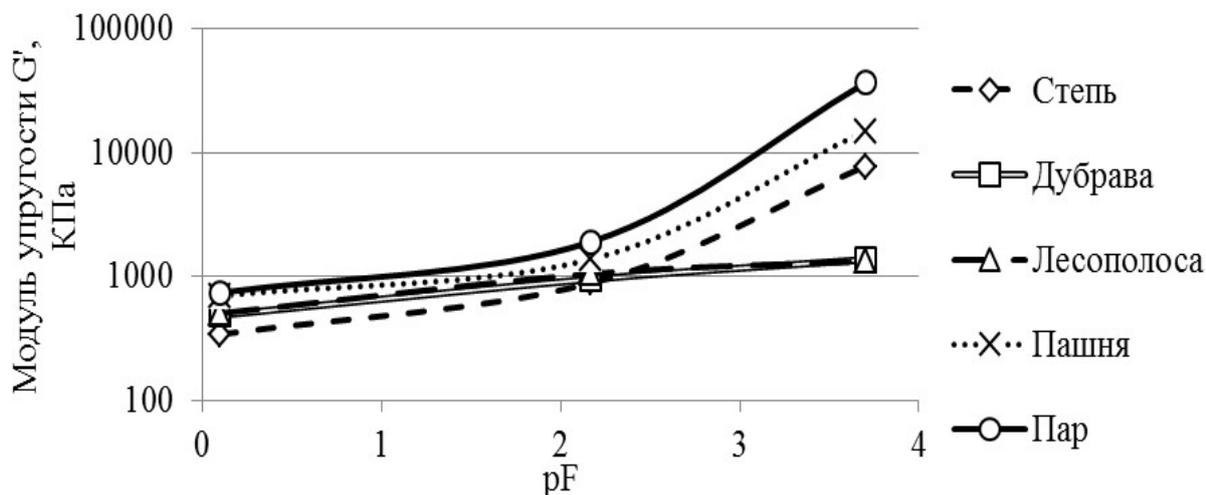


Рис.11. Зависимость модуля упругости гумусированных почв в диапазоне линейной вязкоупругости от потенциала почвенной влаги

График зависимости интеграла Z от потенциала почвенной влаги (рис.12) показывает, как влияет потенциал почвенной влаги на изменение упругопластичного поведения почв.

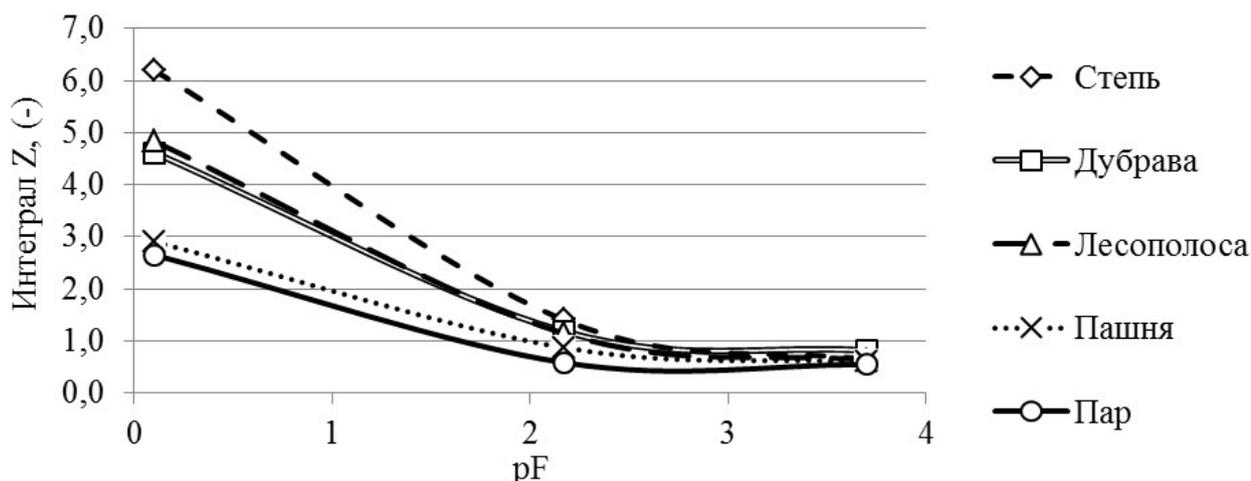


Рис.12. Зависимость величин интеграла Z гумусированных почв от потенциала почвенной влаги

При меньшем pF значения интеграла Z от максимального к минимальному расположились в соответствии с содержанием углерода. Пластичность почв при большом содержании влаги в почве зависит в первую очередь от набухающих свойств почв, что в исследуемых вариантах обусловлено количеством и качеством органического вещества. При увеличении pF почвы становятся менее пластичными и при $\sim 3,7$ pF переходят в упруго-хрупкое состояние, состояние агрегатобразования.

ВЫВОДЫ

1. Впервые определены реологические характеристики чернозема типичного различных землепользований методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Австрия) при различной влажности. Диапазон пластичного поведения резко сокращается при переходе от влажности максимального набухания к влажности предела текучести и к влажности разрыва капилляров. Почвенные пасты при влажности разрыва капилляров характеризуются наибольшей прочностью межчастичного сцепления и наиболее хрупким поведением. Возможно, что именно хрупким поведением объясняется существующее мнение о том, что влажность агрегатобразования соответствует влажности разрыва капилляров.
2. Отработана методика определения реологических характеристик методом амплитудной развертки набухающих почв. Рекомендуется проводить измерения при контроле нормальной силы не более 10Н.
3. Установлено, что реологическое поведение почв в значительной степени определяется содержанием органического вещества, которое может играть как роль связующего, структурирующего межчастичные связи агента при большой влажности и выполнять противозерозионную функцию, так и роль смазки, которая препятствует образованию прочных межчастичных связей минеральной части почв, чем

обеспечивает благоприятное агрегатное строение, не позволяя минеральным частицам цементироваться в глыбы. Образцы, богатые органическим веществом (целина, дубрава, лесополоса), обладают более пластичным поведением и большей устойчивостью к нагрузкам во всем диапазоне влажностей. Образцы с меньшим содержанием органического вещества (длительный пар, пашня) отличались более жестким межчастичным сцеплением и меньшим диапазоном устойчивости к нагрузкам во всем диапазоне влажностей. Выращивание лесополос на старопахотных почвах привело к увеличению содержания органического вещества почв и улучшению структурных характеристик почвы. Использование черноземов Курской области в сельскохозяйственном обороте, в частности их механическая обработка, приводит к ускоренной минерализации органического вещества и соответственно уменьшению содержания углерода, ухудшению структурных свойств - увеличению глыбистой фракции и уменьшению содержания водопрочных агрегатов.

4. Предложен метод определения влажности разрыва капилляров по кривым сушки почвы при постоянной температуре с синхронной фиксацией температуры и влажности.
5. Сопоставление реологических характеристик почв при различных влажностях с их основными гидрофизическими характеристиками показало, что изменение преобладающих сил водоудерживания одной природы к силам другой природы приводящее к изменению подвижности почвенной влаги, вызывает и изменение реологического поведения почв от текучего к упруго-хрупкому. При влажности максимального набухания потенциал почвенной влаги близок к 0, прочность связей или модуль упругости невысок (340-740 кПа), а поведение почвы очень пластично и близко к текучему, при влажности предела текучести ($pF = -2,17$) прочность связей увеличивается (885-1212 кПа), поведение пластично, при влажности разрыва капилляров при $pF = -3,7$, межчастичное взаимодействие увеличивается приблизительно в 3-50 раз (7790-36700 кПа) почва переходит в упруго-хрупкое состояние. Значение влажности разрыва капилляров находится между II и III критическим потенциалом по Воронину на кривых основной гидрофизической характеристики.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые журналы, рекомендованные ВАК

1. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В. Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно нарушенных почвах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2014.- № 6.-С.53-57.
2. Честнова В.В., Хайдапова Д.Д. Физические и реологические свойства чернозема типичного //Сахарная свекла.-2015.- № 9.-С.10-13/
3. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Быкова Г.С., Юдина А.А., Честнова В.В., Фомин Д.С., Ключева В.В. Современные приборные методы исследования гранулометрического состава, реологических характеристик и свойств поверхности твердой фазы почв. // Вестник Оренбургского университета.- 2015.- том 181.-№6.- С.140-145
4. Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании. // Почвоведение. – 2016.- № 8.- С. 955–963

Публикации в прочих научных изданиях

1. Честнова В.В. Реологическая характеристика чернозема типичного Курской области.//XIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых 2012.- Москва: Макс Пресс. - 2012г. - С. 121-122
2. Честнова В.В. Характеристика содержания влаги в черноземах Курской области.// Ломоносов-2013: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция «Почвоведение», 8-13 апреля 2013 г. - Москва: МАКС Пресс, 2013 - С. 222-223
3. Честнова В.В. Агрегатное состояние черноземов типичных Курской области. //Материалы XVI Докучаевских молодежных чтений «Законы почвоведения: новые вызовы. - СПб.: Издательский дом С.-Петербургского государственного университета. – 2013. - С. 126-128
4. Khaydarova D., Chestnova V. Application of amplitude sweep test on rheometer MCR-302 for determine rheological properties of chernozems various land use. // Abstract book «9th International Soil Science Congress on «The Soul of Soil and Civilization» (14-19 October 2014)». - Side, Antalea / Turkey 2014. -С.101
5. Хайдапова Д.Д., Честнова В.В. Физические свойства черноземов, находящихся в различных условиях землепользования. // Материалы международной научной конференции «Современное состояние

- черноземов» - Издательство Южного федерального университета, Ростов-на-Дону. – 2013. - С.331-335
6. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В. Реологические свойства черноземов пахотного поля и под лесополосой. // «V Всероссийская научная конференция по лесному почвоведению с международным участием». Разнообразие лесных почв и Биоразнообразие лесов. - Пушино: ИФХиБПП РАН. - 2013. - С.56-58
 7. Честнова В.В., Хайдапова Д.Д. Методические особенности определения реологических свойств почв методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302. // Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем. - М.: 2015 – С. 55-58
 8. Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Ключева В.В. Реологический подход к оценке деградации структуры почв. // Роль почв в биосфере и жизни человека/ - М.: МАКС Пресс. – 2015. - С. 124-126
 9. Khaydapova D., Chestnova V. The soil water retention, swelling and rheological properties of typical chernozems. // Proceeding of the International Congress on «Soil Science in International Year of Soil» 19-23 October, 2015, Sochi, Russia. - М.: ООО «Буки Веди». - 2015. С. 203-205
 10. В.В. Честнова, Д.Д. Хайдапова. Применение метода амплитудной развертки на реометре MCR-302 для определения реологических свойств черноземов Курской области.// Современные методы исследований почв и почвенного покрова. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 9-11 ноября 2015. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. – 2015. – С. 264 - 266

