

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА»

Факультет почвоведения

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат биологических наук,
доцент Д.Д. Хайдапова

Москва 2017г

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	8
1.1. Реологический подход в исследовании структуры почвы	9
1.2. Структурные связи почвы	10
1.3. Зависимость реологического поведения от свойств почв.....	17
1.4. Формы почвенной влаги. Кинетика сушки.....	20
1.5. Формирование почвенных агрегатов	28
1.6. Водоудерживающая способность почв	30
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	34
2.1. Объекты исследования	34
2.2. Методы исследования.....	41
2.2.1. Методы определения основных агрофизических свойств почв	41
2.2.2. Метод исследования реологических свойств почв	42
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ.....	52
3.1. Основные агрофизические свойства почв.....	52
3.1.1. Валовое содержание углерода.....	52
3.1.2. Гранулометрический состав	53
3.1.3. Удельная поверхность	54
3.1.4. Агрегатный анализ.....	54
3.2.4. Набухание	56
3.2.5. Кривые сушки	57
3.2.6. Основная гидрофизическая характеристика	59
3.2.7. Прочность почвенных паст.....	63

3.2. Реологические свойства изучаемых почв.....	66
3.2.1. Методические особенностей определения реологических параметров поведения почвенных паст методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302.....	66
2.3.1. Реологические свойства исследуемых почв разной влажности	68
3.2.3. Сравнение реологических свойств гумусированных и иллювиальных горизонтов.....	75
3.3. Взаимосвязь реологических параметров с основной гидрофизической характеристикой (на примере гумусированных горизонтов).....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
ВЫВОДЫ.....	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	89
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Реологические свойства почв являются функциональным проявлением поверхностных свойств твердой фазы почв. Эти свойства обусловлены минералогическим составом, дисперсностью почвы, количественным и качественным составом органического вещества. С другой стороны они зависят от количества и типов контактов между почвенными частицами и определяют устойчивость, деградацию и формирование почвенной структуры. Прочность 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 физики почв.

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 реологических параметров поведения почвенных паст методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302 (AntonPaar, Austria).

2. Оценить влияние влажности на реологические параметры 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, удельная поверхность) и содержание углерода.
5. Выявить взаимосвязь реологических параметров 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 почв при различном содержании влаги.

В результате сопоставления реологических характеристик поведения черноземов разной влажности с основной гидрофизической характеристикой показана 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 противозерозионной 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), Докучаевские молодежные чтения (Санкт-Петербург, 2013), на IV конференции молодых ученых "Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем" (Москва, 2015) и на заседаниях кафедры физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ.

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 приложений.

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. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В почвоведении распространено представление о структуре почвы как способности почв образовывать агрегаты из элементарных почвенных частиц взаимодействующих в силу коагуляции коллоидов, склеивания, слипания их в результате действия сил Ван-дер-Ваальса, остаточных валентностей и водородных связей, адсорбционных и капиллярных явлений в жидкой фазе, а также с помощью корневых тяжей и гифов грибов. 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 параметрах, как характер взаимодействия структурных элементов, оценка сил взаимосвязи и сцепления между частицами, структура порового пространства, что выражается в физико-механических свойствах почвы: плотность, твердость, водоустойчивость, липкость, пластичность, сопротивление сдвигу, сцепление, водо-, воздухопроницаемость и др.. 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.).

1.1. Реологический подход в исследовании структуры почвы

Реология – наука о течении и деформации тел, возникла в целях описания деформационных свойств реальных материалов, которые по своему поведению отличаются от идеальных моделей Гука и Ньютона. Реологические процессы проявляются в виде ползучести, деформации и снижения прочности при длительном воздействии нагрузок и характерны для всех тел, зависит только от промежутка времени. Поэтому, основной задачей реологии является изучение напряженно-деформированного состояния и его изменения во времени (Вялов, 1978). Результаты измерения реологических свойств могут быть сопоставлены со структурными, химическими и физическими свойствами веществ (Малкин, Исаев, 2007). Изучение реологических свойств почв позволяет дать количественную оценку устойчивости почвенной структуры, пластичности и прочности межчастичных связей. Реологические свойства зависят от гранулометрического и минералогического составов, количественного и качественного состава органического вещества в почве, применения удобрений и осмотического потенциала почвы, а также взаимодействия с почвенными флорой и фауной (Горькова, 1975; Аbruкова, 1970; Манучаров, 1983; Baumgarten, 2012; Lal, 1993, и др.)

Первыми начали применять реологические подходы для исследований структурных свойств почв в 70-80-х годах прошлого столетия И.М. Горькова (1975), Л.П. Аbruкова (1977), А.С. Манучаров (1983) и др. Исследования реологических характеристик почв на «Реотесте-2» методом коаксиальных цилиндров показали ряд интересных полуколичественных характеристик поведения почвенных образцов, относящиеся больше к области вязкого поведения. По форме петель гистерезиса, образующихся при увеличении скорости сдвига и обратном ходе, снижении скорости сдвига, можно описать характер восстановления разрушенных связей и тип структурных связей.

В настоящее время появились приборы нового поколения, которые позволяют значительно расширить количество и точность физически обоснованных реологических параметров, с помощью которых становится возможным определение межчастичного взаимодействия и прогнозирование поведения микроструктуры почвы, подвергающейся нагрузкам. В частности, колебательные методы, проводимые параллельными плато реометра MCR-302, применены и рекомендованы для изучения реологических свойств почв рядом исследователей (Markgraf и др, 2006, 2011; 2012, Хайдапова и др, 2014, 2016; Болотов, 2015; Шеин и др., 2014,) как подходящие методы для определения реологического поведения почв, особенно в вязкоупругой области до перехода в область вязкого течения.

1.2. Структурные связи почвы

П.А. Ребиндер (Ребиндер, 1966) изучал проблему образования различного рода пространственных структур в дисперсных системах. По характеру структурообразования эти системы разделяет на 3 типа структур: коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные.

Простейший и наиболее распространенный тип дисперсных структур – коагуляционные структуры, образованные сцеплением частиц ван-дер-ваальсовыми силами не в компактные агрегаты, а в цепочки и неупорядоченные пространственные сетки – рыхлые каркасы из первичных частиц, их цепочек или агрегатов. Более характерны коагуляционные структуры при малом объемном содержании дисперсной фазы, при достаточно высокой дисперсности, и особенно, если поверхность частиц мозаична или они анизометричны. При образовании коагуляционной структуры и отдельных ее элементов в контакте между частицами остается весьма тонкий равновесный слой жидкой дисперсионной среды. Именно в связи с содержанием тонких устойчивых прослоек жидкой среды в участках коагуляционного сцепления, препятствующих дальнейшему сближению

частиц, коагуляционные структуры обладают характерными механическими свойствами. Таковы пониженная прочность (на несколько порядков более низкая, чем достаточно высокая прочность при той же степени объемного заполнения, но при фазовых контактах между частицами), ползучесть даже при самых малых напряжениях сдвига и структурная вязкость, а в более концентрированных дисперсиях (пастах) – явная пластичность. Коагуляционные структуры способны также к замедленной упругости. Высокоэластичное последствие в коагуляционных структурах связано с взаимной ориентацией анизометричных частиц – палочек, цепочек или пластинок, образуемых изометричными частицами в направлении сдвига.

В плотных коагуляционных структурах, обладающих довольно высокой прочностью, контакты частиц еще не фазовые, а точечные, т. е. соответствуют площадкам в один или несколько атомов или одну ячейку кристаллической решетки. Между этими контактами остаются открытые поры, что и является причиной обратимой потери прочности. Коагуляционные структуры характерны для глинистых и почвенных суспензий. Они обладают тиксотропными свойствами, то есть способностью после механического разрушения полностью в течение времени восстанавливать свою первоначальную прочность.

Конденсационные структуры – характеризуются прочным межчастичным сцеплением, т.к. их формирование связано с удалением воды из коагуляционных структур путём естественного или искусственного высушивания (например, призмовидно-ореховатая структура солонцов в сухом состоянии обладает очень прочной конденсационной структурой). При осаждении органического вещества на минеральную часть почвы происходит формирование цементационно-конденсационных структур очень высокой прочности.

Конденсационные структуры теряют тиксотропные свойства и пластичность, приобретают прочность и хрупкость. Конденсационная структура при увлажнении может быть обратно переведена в

коагуляционную. Кристаллизационные структуры обладают самыми прочными связями, которые осуществляются главными химическими валентностями (ковалентными). В отличие от коагуляционных и конденсационных структур кристаллизационные структуры всегда связаны с возникновением новой кристаллической фазы с очень прочными контактами частиц новообразований (например, кристаллизация гипса, карбонатов, гидрогелей кремнекислоты, возникновение органо-минеральных комплексов в почвах, полимеризующиеся высокомолекулярные органические соединения).

Кристаллизационные структуры отличаются значительно большей прочностью и хрупкостью по сравнению с конденсационными структурами, обнаруживают необратимое разрушение структур при механическом воздействии.

При значительном повышении температуры атомные контакты частиц переходят путем спекания в прочные фазовые контакты под действием молекулярных сил – с уменьшением свободной поверхностной энергии. В отличие от коагуляционных структур, разрушающихся обратимо, структуры с непосредственными атомными и фазовыми контактами являются необратимо разрушающимися. Кристаллизационные дисперсные структуры могут возникать при образовании кристалликов новой фазы из пересыщенных растворов. Даже у вполне жестких частиц коагуляционные структуры обладают характерными именно для этих структур механическими свойствами – вязкопластичностью и вязкоэластичностью. В отличие от них необратимые конденсационные (кристаллизационные) структуры оказываются хрупкими телами из-за жесткости контактов и обладают лишь особенностями, свойственными их элементам – частицам, сцеплением которых они образовались (Ребиндер, 1966)

Развивая основные положения П.А. Ребиндера И.М. Горьковой (Горькова, 1975) и Г.И. Фуксом (Фукс, 1951) приведены классификации структур. Л.П. Аbruкова в своих исследованиях проанализировала и

сопоставила эти классификации (Абрукова, 1970, 1972, 1977). Классификация Г.И. Фукса является связующим звеном между классификациями П.А. Ребиндера и И.М. Горьковой и наиболее отвечает требованиям при выделении типов структурообразования в почвенных суспензиях. В основу классификации Г.И. Фукса положено деформационное поведение дисперсных систем – характер восстановления сопротивления деформации. Почвенные коллоиды в своём развитии проходят ряд ступеней структурообразования и при их старении могут формироваться структуры различной прочности. Дисперсные системы, которые при механическом воздействии разрушаются почти необратимо или скорость восстановления сопротивления деформации слишком мала, получили название тиксолабильных систем. Эти системы близки стабилизационным структурам, выделенным И.М. Горьковой: они также обладают слабой обратимостью. Тиксотропные системы полностью восстанавливают сопротивление деформации на любой стадии разрушения структуры и соответствуют определениям коагуляционных структур по Ребиндеру и Горьковой. Тиксостабильные системы характеризуются тем, что на них деформация не оказывает влияния (верней, скорость восстановления разрушенной структуры настолько велика, что практически не сказывается на результатах измерения). Тиксостабильные системы по свойствам близки смешанным коагуляционно-конденсационным структурам И.М. Горьковой, а также конденсационным и кристаллизационным структурам П.А. Ребиндера.

В своих исследованиях Л.П. Абрукова (Абрукова, 1970, 1972, 1977) занималась изучением реологических свойств почв, таких как тиксотропия, реопексия и дилатансия.

Тиксотропия – это специфическая способность коагуляционных структур при влажности выше верхнего предела пластичности разжижаться в результате механического воздействия, а по прекращении последнего – восстанавливать свое прежнее состояние. При снятии напряжения коагуляционные структуры самопроизвольно в течение определенного

времени восстанавливают свою прочность. Явление тиксотропии происходит в результате теплового броуновского движения коллоидных частиц почвы в изотермических условиях. При тиксотропном структурообразовании между почвенными частицами осуществляется электростатическая связь. Тиксотропное состояние почв и пород зависит от минералогического состава, дисперсности, гидрофильности и влажности органических и минеральных веществ, состава обменных оснований, содержания солей в растворе, его реакции, концентрации суспензии и др. Главное значение имеет соотношение между водой, дисперсностью, гидрофильностью, которые в свою очередь зависят от состава и свойств твердой фазы почв, температуры, времени, количества осадков, интенсивности орошения. Тиксотропное структурообразование почв и пород проявляется в рыхлом расположении твердых частиц почвы и коллоидов, между которыми заключены слабо ориентированные молекулы воды. Такие частицы связаны между собой слабыми силами когезии, а на поверхности коллоидов – сильными силами адгезии минеральных, органических веществ и водных пленок. По мнению Л.П. Абриковой, постоянных тиксотропных почв нет, а есть почвы, в которых при соответствующих условиях (например, при избыточном увлажнении) могут формироваться коагуляционные структуры различного характера. При увлажнении и деформировании прочность коагуляционных структур понижается, увеличивается способность к разжижению, а при высыхании эти структуры переходят в конденсационно-кристаллизационные с большой прочностью (Абрикова, 1970; Горбунов и др., 1974). Структурообразование в суспензии типичного мощного чернозема относится к типу смешанных коагуляционно-конденсационных структурных связей, характеризующихся большой прочностью, так как эти структуры возникают при цементации почвы органическим веществом, карбонатами, аморфным кремнеземом, окислами железа и т. п. (Абрикова, 1972)

Реопексия – редкое свойство некоторых неньютоновских жидкостей, состоящее в том, что с увеличением напряжений сдвига в жидкости с

течением времени увеличивается её вязкость. Реопексационные жидкости, такие как некоторые смазочные материалы, густеют и даже твердеют, когда их перемешивают. Явления типа реопексии часто встречаются при реологических исследованиях. Так, наблюдается увеличение контактов и, естественно, усиление структурных связей в процессе приложения нагрузки к почвам тяжелого гранулометрического состава с преобладанием прочных коагуляционно-конденсационных структур. Почвы легкого гранулометрического состава кривых реопексии не дают, они проявляют дилатансию. Дилатансия - поведение весьма характерное для грубодисперсных (опесчаных) почв, где проявляется истинная дилатантность. В большинстве случаев в почвах проявляется «ложная» дилатансия, обусловленная наличием в почве прочно сцементированных агрегатов (Абрукова, 1977).

А.В. Аксенов (2001), Д.Д. Хайдапова (2001), Т. Сакункончак и др. (2009) изучали прочностные и физико-механические характеристики почв. По мере увеличения влажности значение пластической прочности увеличивается, достигает максимума, затем уменьшается. Физический смысл такого хода кривой заключается в том, что в сухом состоянии растертая и просеянная через сито почва представляет собой порошок, где частицы почвы не связаны между собой и не имеют прочности. Небольшое увеличение содержания воды увеличивает толщину водных прослоек вокруг частиц, в отдельных местах они начинают взаимодействовать друг с другом, почва приобретает свойства связности, начинает проявляться прочность. По мере дальнейшего увеличения влажности водные оболочки вокруг частиц достигают такого состояния, при котором удерживаются почвенными частицами с достаточной силой, а соприкасаясь друг с другом, прочно удерживают частицы друг возле друга; почва при этом обладает наибольшей прочностью. Показано, что кривые зависимости пластической прочности от влажности характеризуют широкий диапазон изменения состояния почвы от упруго-хрупкого до текучего и дают возможность оценивать структурное состояние. Физическое

состояние почвы как результат взаимодействия твердой и жидкой фаз можно оценить посредством прочности структурных связей, которая находится в тесной связи с содержанием органического вещества, гранулометрическим составом, величиной удельной поверхности, влажностью и другими почвенными характеристиками. Разрушение структуры вызывает увеличение суммарной активной поверхности почвы, что сопровождается увеличением набухаемости и усадки, и в конечном итоге может привести к значительному уплотнению почвы при дегидратации.

Величины прочности количественно показывают силу межчастичного взаимодействия при том или ином содержании влаги. Величины прочности почвы в состоянии пасты позволяют количественно оценить потенциальную способность твердой фазы почвы к образованию межчастичных связей. Величины прочности агрегатов показывают прочность межчастичных связей в состоянии естественного сложения, на агрегатном уровне организации почв. Значения прочности агрегатов меньше, чем в пастах. Отношение прочности агрегатов к величине прочности почвы в состоянии пасты при равном уровне увлажнения дает возможность количественно оценить структурное состояние почвы (Хайдапова, Пестонова, 2007). Реологическое поведение жидко - и твердообразных тел, в том числе и почв, можно оценить по зависимостям пластической прочности от нагрузки (так называемым реологическим кривым). Для почв, находящихся в состоянии, близком к насыщению влагой, характерно появление предельного напряжения сдвига. До максимального значения сдвигового давления почва проявляет упругие свойства и деформируется обратимо. При достижении этого предела почва начинает «течь». Полное разрушение структурных связей приводит к необратимой деформации. Данные по физико-механическим свойствам почв, формирующихся в склоновом рельефе, применимы при разработке адаптивно-ландшафтного землепользования, при составлении почвенно-экологических карт и планировании мелиоративных мероприятий (Дармаева и др., 2012)

1.3. Зависимость реологического поведения от свойств почв.

Почва представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Основой всех специфических особенностей почвы как среды для роста и развития растения является ее твердая фаза.

В процессе почвообразования твердая фаза почвы подвергается различным воздействиям и изменяется. Она состоит из обломков различного химико-минералогического состава разной степени дисперсности, органического вещества с разной степенью разложения и находящееся с минералами почвы в биологическом, физическом и химическом взаимодействии. Минералы представлены в почве в виде первичных силикатов, с преобладанием ковалентных связей, простых солей, с преобладанием ионных связей, глинистых минералов, с несколькими видами связей без четкого преобладания какой либо одной. Наиболее активными компонентами являются коллоидно-глинистые частицы, обладающие большой удельной поверхностью (Вялов, 1978). В ходе физического выветривания минералы ведут себя неодинаково. Кварц обладает наибольшей механической прочностью, за ним следуют полевые шпаты, роговые обманки и пироксены, затем слюды. Менее прочные минералы измельчаются легче, и ими обогащаются мелкие фракции, крупные фракции обогащаются кварцем.

Наиболее распространенными и резко различными свойствами являются две группы минералов – каолиниты и монтмориллониты. Минералы, относящиеся к каолинитам, обладают однослойной кристаллической решеткой с жесткими межслойными связями и небольшим межплоскостным расстоянием $7.1\text{\AA}$. Монтмориллониты характеризуются трех пакетной кристаллической структурой с подвижными связями между собой и широким межплоскостным расстоянием $17.6\text{\AA}$, что позволяет данному минералу

сорбировать большое количество влаги или других веществ и расширяться (Горбунов, 1974). Следовательно, преобладание в минералогическом составе почв тех или иных минералов обуславливает проявление различных физических и реологических свойств почв (Ghezzehei and Or, 2001; Markgraf и др. 2010). В работе Д.Д. Хайдаповой и др. (2015) изучены реологические свойства отдельных минералов – каолинита, монтмориillonита и образцов глинистых почв с очень малым содержанием органического вещества. Показано, что почвы, в которых преобладает каолинит и ненабухающие минералы характеризуются жестким структурными связями и хрупким поведением под нагрузкой, почвы, в которых содержится среди глинистых минералов монтмориillonит или минералы набухающие характеризуются слабыми структурными связями и пластичным поведением под нагрузкой.

Реологические свойства почв зависят от ее дисперсности. С размерами почвенных частиц связаны физические, химические и биологические свойства почвы. В процессе диспергирования любого твердого тела увеличивается его удельная поверхность. С ней тесно связана свободная поверхностная энергия системы. В процессе измельчения твердого тела часть молекул, атомов и ионов, которые ранее были связаны в кристаллических решетках, выходят на поверхность, и их энергия оказывается некомпенсированной. Следовательно, диспергация приводит к увеличению удельной поверхности, а также повышению поверхностной энергии системы. Такие системы всегда стремятся к самопроизвольному понижению энергии за счет адсорбции газов и паров свободными поверхностями почвенных частиц, а также ионов и молекул из растворов и слипанием почвенных частиц (Вершинин, 1959; Лукьянов, 1980). С увеличением дисперсности увеличивается площадь взаимодействия между частицами, во влажных почвах это взаимодействие происходит через водные пленки или капилляры, заполненные водой, поэтому почва проявляет повышенные пластичные свойства, в отсутствии воды множественные контакты превратятся в прочные конденсационные связи (Хайдапова и др., 2016).

Наличие и состав почвенного органического вещества существенно влияет на ее физико-механические и реологические свойства, приводят к увеличению пластичности, и в то же время улучшают водоустойчивость почв (Markgraf и др, 2006; Федотов и др., 2014., Вялов, 1978, Честнова, Хайдапова, 2015 и др).

Органическое вещество и его составляющие, такие как тонкие корни, грибы, гифы влияют на устойчивость почв и этот эффект наиболее очевиден при большом содержании влаги (Markgraf, 2011, Хайдапова и др, 2014, 2016).

Органическое вещество почвы - это многокомпонентная система органических соединений, важным свойством которых, является способность проявлять как гидрофильные, так и гидрофобные качества. Исследованиями Е.Ю. Милановского (Милановский, 2009) показано, что в зависимости от геохимической обстановки, гидрофильные гумусовые вещества остаются на месте контакта с минеральной матрицей, выносятся в составе металл-органических комплексов за пределы почвенного профиля или осаждаются в иллювиальном горизонте профиля. Гидрофобные компоненты гумусовых веществ – микробиологически и химически устойчивые продукты гумификации органического материала *in situ*, способствуют образованию водопрочной почвенной структуры. (Милановский, 2009). Такое воздействие гидрофобного органического вещества отмечено многими исследователями (Piccolo, 1999; Chenu, Heenan, 1999;).

В процессе изучения особенностей реологического поведения почв различного сельскохозяйственного использования и взаимосвязи с содержанием органического вещества необходимо понимать причины уменьшения содержания гумуса. В работе Орлова Д.С. приведены следующие причины потерь гумуса пахотными почвами (Орлов , 1985):

- 1.уменьшение количества растительных остатков, поступающих в почву, при смене естественного биоценоза агроценозом.

- 2.усиление минерализации органического вещества, в результате интенсивной обработки и повышения степени минерализации почв.

3.разложение и биодеградацию гумуса под влиянием физиологически кислых удобрений и активизации микрофлоры за счет вносимых удобрений.

4.усиление минерализации в результате осушения переувлажненных почв, усиления минерализации гумуса орошаемых почв в первые годы орошения.

5. потери гумуса в результате ветровой и водной эрозии.

1.4. Формы почвенной влаги. Кинетика сушки

Решающее влияние на процесс формирования почвенной структуры оказывает наличие в почве почвенной влаги. Изучение процессов взаимодействия почвенной влаги с твердой фазой почвы необходимо для более полного понимания процессов формирования структурных связей между почвенными частицами.

Изучение кинетики сушки почв может служить в качестве одного из способов получения информации о закономерностях взаимодействия воды с твердой частью почвы. Термическая сушка почвы, отличающаяся сложными физико-химическими связями воды с твердыми частицами, представляет сложный процесс, что в целом убедительно подтверждается обширным экспериментальным материалом, который можно найти в работах таких исследователей как Ф.Е. Колясев (1939), А.В. Лыков (1968), В.А. Капинос (1991).

Ф.Е. Колясев (1939, 1944) изучал механизм испарения воды почвой, понимая под ним кинетику высыхания различных почв, как без подтока, так и с подтоком к ним влаги. Он изучал вертикальную гетерогенность испаряющего почвенного слоя и увязал кинетику данного процесса с подвижностью отдельных категорий почвенной влаги, участвующей в испарении.

В результате проведенных опытов, Ф.Е. Колясев выяснил, что кривая скорости испарения влажной почвы может быть разбита на три этапа:

1) постоянная скорость испарения, величина которой определяется не почвенными условиями, а внешними факторами в виде скорости ветра, влажности воздуха и температуры.

2) начиная с момента подсыхания верхнего слоя почвы, т.е. образования диффузного слоя, скорость испарения линейно и резко убывает и величина испарения полностью определяется, с одной стороны, скоростью подтока влаги к горизонту испарения (в этом случае идет внутripочвенное испарение), а с другой – физическим состоянием диффузного слоя, через который в силу градиента упругости водяных паров транспортируется влага, отдаваемая почвой в атмосферу.

3) Наконец, третий этап высыхания почвы характеризуется также линейным, но медленным затуханием скорости испарения и обычен для почв с низкой влажностью вплоть до гигроскопической. Общая сумма испаряющейся влаги составляется из отдельных категорий воды, имеющих различную подвижность в почве (капиллярная, парообразная, пленочная). В засушливых районах водный режим почвы определяется, главным образом, внутripочвенным испарением и потерей парообразной влаги диффузным путем. Воздействием на физическое состояние слоев, участвующих в испарении, возможно регулировать расход отдельных категорий почвенной влаги. Комбинацией рыхлых и плотных слоев в пределах пахотного горизонта удастся сократить расход как капиллярной, так и парообразной влаги (Колясев, 1939). Позднее, Ф.Е. Колясев (Колясев, 1944) исследовал влияние отдельных факторов на скорость передвижения воды в почве. Им было установлено, что при влажности почвы порядка максимальной молекулярной влагоемкости изменение плотности и разница во влажности почвы не являются факторами, влияющими на передвижение влаги в почве. Вода при этих влажностях будет двигаться лишь в случае наличия в почве градиентов температуры или осмотического давления. Только при наличии в почве свободной капиллярной воды разница во влажности может иметь значение в движении почвенной влаги. По его мнению, движение воды в

почве обусловлено рядом физических и химических факторов, значение которых на различных ступенях увлажнения не равноценно. Если при высокой влажности вода в почве, очевидно, движется под совокупным влиянием градиентов влажности, плотности, осмотического давления и температуры, то при наличии в почве только связанной воды главнейшими факторами движения будут температурные изменения и изменения концентраций почвенных электролитов (Колясев, 1944).

Процесс сушки в своих работах изучал А.В. Лыков (1968). В книге «Теория сушки» он разделил все влажные материалы в зависимости от их коллоидно-физических свойств на три вида:

1. Типичные коллоидные тела (эластичные гели). При удалении жидкости значительно изменяют свои размеры (сжимаются), но сохраняют свои эластичные свойства (желатин, агар-агар)

2. Капиллярнопористые тела (хрупкие гели). При удалении жидкости эти тела становятся хрупкими, мало сжимаются и могут быть превращены в порошок (влажный кварцевый песок, древесный уголь и т. д.)

3. Капиллярнопористые коллоидные тела, обладающие свойствами первых двух видов. Стенки их капилляров эластичны и при поглощении жидкости набухают. К числу этих тел принадлежат большинство материалов, подвергаемых сушке, в том числе и почвы.

Для того чтобы изучить процесс сушки, необходимо понимать, какими силами удерживается влага на поверхности твердой фазы почвы. А.В. Лыков опирается на классификацию форм связи вещества (влаги) с материалом по схеме П.А. Ребиндера (Лыков, 1968), где все формы связи делятся на три большие группы: химическая связь, физико-химическая связь, физико-механическая связь.

Химически связанная вода удерживается наиболее прочно и при нагревании тела до 120-150°C не удаляется. Различают воду, связанную в виде гидроксильных ионов, и воду молекулярных соединений типа кристаллогидратов, последняя связана значительно слабее первой.

Адсорбционно связанная вода в основном представлена мономолекулярным слоем на внутренних и внешних поверхностях капиллярнопористого тела.

Капиллярно связанная вода - вода, заключенная в капиллярах и ограниченная менисками. Она является свободной водой, за исключением тончайшего слоя воды, адсорбционно связанной у стенок капилляра.

Осмотически связанную воду можно считать энтропийно связанной. Осмотический характер связи наиболее выражен в разбавленных растворах, где в отличие от энергетического связывания воды химическими и молекулярными силами связь определяется величиной энтропии.

Более подробно связанную воду почв и грунтов изучал П.И. Андрианов (1946). По его мнению, свободная вода обладает некоторой изменчивой структурой, и эта оструктуренность переходит в иную с приближением молекул воды к твердой поверхности. Силы взаимодействия между твердой поверхностью он разделяет на физические и химические. Силы химические дают новые химические соединения, насыщают свободные положительные или отрицательные заряды и связаны с перегруппировкой электронов. Эти силы отличаются большей величиной. Если на твердой поверхности имеются заряженные (ненасыщенные) места, то дипольная молекула воды силами химическими способна их насытить. Силы физические, подобные силе тяготения, постепенно затухают с удалением от поверхности, не имеют резкой границы насыщения и значительно меньше сил физических. Эта категория сил называется ван-дер-ваальсовскими силами. При их действии перегруппировки электронов не происходит и новых соединений не образуется. Как физические, так и химические по своей природе силы электрические.

Пленочная влага, или влага смачивания, соответствует такому состоянию влажности почвы, при котором прекращается действие молекулярных сил между частицами почвы и воды; этот предел должен определяться максимальной смачиваемостью активной поверхности почвы.

А.В. Лыков (1968) под кинетикой процесса сушки понимал изменение среднего влагосодержания и средней температуры тела с течением времени. Эти закономерности кинетики процесса сушки позволяют рассчитать количество испаренной влаги из материала и расход тепла на сушку. Изменения средних влагосодержания и температуры тела с течением времени (динамика процесса сушки) в первую очередь определяются закономерностями взаимодействия тела с окружающей средой, т.е. внешним тепло - и массообменом.

Особенности процесса сушки влажных материалов выявляются по характеру изменения локальных влагосодержания и температуры с течением времени. Эти экспериментальные закономерности должны рассматриваться одновременно в их взаимосвязи.

В начале процесса убыль влагосодержания происходит медленно. В этот сравнительно небольшой промежуток температура во всех измеряемых точках материала увеличивается с течением времени (предполагается, что начальная температура материала меньше температуры адиабатического насыщения воздуха). Поэтому эта стадия процесса сушки называется начальной стадией или стадией прогрева материала. Если начальная температура материала выше температуры термометра, то в начальной стадии происходит охлаждение материала. В этом случае начальная стадия будет стадией охлаждения материала. После начальной стадии влагосодержание материала уменьшается с течением времени по линейному закону (кривая сушки на этом участке имеет вид прямой). Следовательно, убыль влагосодержания в единицу времени (скорость сушки) будет величиной постоянной.

Поэтому этот период сушки называют периодом постоянной скорости, он характеризуется неизменной температурой материала. Этот период продолжается до некоторого влагосодержания, начиная с которого температура поверхности материала повышается с течением времени, а скорость сушки уменьшается. Температура центра образца материала также

повышается с течением времени, но температурная кривая немного отстает от температурной кривой для поверхности тела. Таким образом, внутри материала возникает градиент, который постепенно уменьшается и при достижении равновесного влагосодержания становится равным нулю. В равновесном состоянии убыли влагосодержания не происходит, а температура материала равна температуре воздуха. Этот период сушки с непрерывным повышением температуры материала и с непрерывным уменьшением скорости сушки называют периодом падающей скорости.

Весь процесс сушки можно разделить на два периода: период постоянной скорости (температура материала постоянна) и период падающей скорости (температура материала переменна). Влагосодержание, соответствующее переходу первого периода во второй, называют критическим влагосодержанием. Материалы, различные по характеру связи влаги, дают разную форму кривой скорости сушки. Период постоянной скорости характеризуется постоянной скоростью сушки и постоянной температурой материала, а период падающей скорости – убывающей скоростью сушки и возрастающей температурой материала. Температурные кривые дают возможность определить различную форму связи влаги с материалом, в том числе и разный вид капиллярной влаги (стыковое, канатное состояние) и влаги адсорбции. Температурные кривые имеют большое значение для технологии сушки, так как качество высушенного материала в значительной степени зависит от величины температуры материала и длительности ее воздействия. Процесс сушки материала состоит из перемещения влаги внутри материала, парообразования и перемещения влаги с поверхности материала в окружающую среду. При соприкосновении влажного материала с нагретым воздухом жидкость на поверхности испаряется и путем диффузии покидает поверхность материала, переходя в окружающую среду. Испарение влаги с поверхности материала создает перепад влагосодержания между последующими слоями и поверхностным слоем, что вызывает обусловленное диффузией перемещение влаги из

нижележащих слоев к поверхностным. Наличие температурного градиента внутри материала осложняет механизм переноса влаги. В простейшем случае испарение происходит на поверхности материала, а образующийся пар диффундирует в окружающую среду. В более сложных ситуациях испарение происходит внутри материала, в определенной его зоне или во всей массе материала, причем перемещение влаги внутри материала происходит как в виде жидкости, так и в виде пара. Скорость перемещения влаги внутри материала зависит от формы связи ее с материалом, поэтому процесс сушки является физико-химическим.

Характер протекания процесса сушки определяется механизмом перемещением влаги внутри материала, энергетикой испарения и механизмом перемещения влаги с поверхности материала в окружающую среду через так называемый пограничный слой, расположенный у поверхности материала (Лыков, 1968).

Н.И. Гамаюнов (1985) изучал процесс структурообразования при сушке капиллярно-пористых материалов. На начальной стадии сушки во влагонасыщенном материале на поверхности образцов кривизна менисков мала, поэтому капиллярные давления также невелики. По мере испарения влаги кривизна менисков возрастает. Возникающее при этом лапласово давление через связанные с менисками пленки влаги передается на частицы. В пленке жидкости развивается расклинивающее давление, равное лапласову. Это давление приложено нормально ко всей открытой для испарения поверхности набухшей частицы и передается на скелет (твердую фазу) частицы, вызывая его сжатие. Если сопротивление частиц мало, то происходит существенное их уплотнение и выжимание из внутренних пор иммобилизованной влаги. Материал приобретает по мере десорбции влаги более плотную упаковку за счет сдвига частиц под действием менисковых сил, что приводит к усадке материала. Поступающая на поверхность и в зазоры между частицами иммобилизованная влага вызывает утолщение пленки вокруг частицы и уменьшение кривизны менисков. К уменьшению

кривизны менисков также приводит сближение частиц, и следовательно, к снижению капиллярного давления. Этот процесс продолжается до тех пор, пока частицы не сблизятся настолько, что начнут существенно проявляться силы ионно-электростатического отталкивания и молекулярного притяжения между ними.

Роль капиллярных давлений способствует сближению частиц, росту числа когезионных контактов, т.е. увеличению прочности. С ростом температуры капиллярные давления уменьшаются из-за снижения поверхностного натяжения воды, а также вследствие увеличения взаимных подвижностей частиц из-за уменьшения вязкости дисперсионной среды (воды).

В 1991г., основываясь на работах Колясева и Лыкова, В.А. Капинос, Ю.В. Егоров и Мустафа Дарвиш Омар (Капинос и др., 1991) также проводили исследование процессов кинетики сушки. В задачу данного исследования входило изучение основных закономерностей кинетики сушки влажных почв на основании полученных экспериментально (при постоянных температуре воздуха и относительном давлении паров воды в нем) кривых зависимости скорости сушки от влажности почвы и термограмм сушки с параллельной оценкой энергетического состояния воды в исследуемых почвах. Работа была выполнена на специальной установке для термогравиметрического анализа. Данная установка позволяла автоматически регистрировать с помощью трехточечного самописца изменение веса образца почвы в процессе сушки и перепады температуры образца и окружающего пространства. В результате проведенных опытов, после получения кривых сушки, учеными были сделаны выводы, что особенности процесса сушки влажных почв выявляются как по характеру изменения скорости испарения воды в зависимости от влагосодержания почвы, так и по изменению ее температуры с течением времени. Поэтому полученные экспериментальные закономерности правильно рассматривать в

их взаимосвязи. Такой подход позволяет весь процесс сушки почв надежно разделить на два периода:

- 1) период постоянной скорости сушки и постоянной температуры образца;
- 2) период падающей скорости сушки и повышающейся температуры почвы;

На основании исследования изменения температуры почвы в процессе ее сушки можно точно и строго определить наибольшее количество адсорбированной прочносвязанной воды, находящейся под сильным влиянием молекулярных электростатических сил, возникающих на поверхности твердой части, вследствие чего структура и свойства данной категории воды резко изменены по сравнению с теми, которые наблюдаются в объеме, что дает основание говорить об особом фазовом состоянии прочносвязанной влаги, являющейся совершенно недоступной растениям. И в заключении авторами был сделан один общий вывод. Изучение кинетики сушки влажных почв при постоянной температуре окружающего воздуха и относительным давлением паров воды в нем может служить лишь в качестве вспомогательного средства для определения структурно-функциональных физических свойств почв, так как с помощью кривых скорости сушки и температурных кривых надежно могут быть установлены лишь такие характеристики, как максимальная адсорбционная влагоемкость почв и максимальное количество пленочной влаги, соответствующее влагосодержанию при первом критическом капиллярно-сорбционном потенциале воды, тесно связанном с рядом важнейших гидрофизических характеристик почв.

1.5. Формирование почвенных агрегатов

Для того, чтобы понять процесс разрушения структуры необходимо изучить механизм формирования почвенных агрегатов. Агрегатообразование

почвы играет важную роль в изучении структуры почвы и в оценке структурной устойчивости (Качинский, 1963, 1965) . Изучение морфологического строения почвенного агрегата позволило разработать множество механизмов процесса структурообразования.

К.К. Гедройц (1912) предположил, что в процессе агрегатообразования большую роль играет давление корней растений и свертывание коллоидов. Коллоидные частицы служат клеящим веществом почвы; при их насыщении двухвалентными катионами устойчивость склеивания повышается, а одновалентными, наоборот, понижается в результате пептизации почвенных коллоидов. Также было отмечено, что образование агрегатов может происходить под воздействием электролитов, высушивания и замораживания почв.

И.Н. Антипов-Каратаев, В.В. Келлерман и Д.В. Хан (Антипов-Каратаев и др., 1948) развили теорию структурообразования К.К. Гедройца. На первом этапе формирования агрегатов минеральные коллоиды слипаются друг с другом, на втором этапе происходит склеивание полученных образований минеральными аморфными клеями. Третий этап заключается в дополнительном склеивании этих частиц органическим веществом.

Влияние корневой системы растений также подчеркивал В.Р. Вильямс (1935). Корни растений механически раздвигают почвенную массу, формируя зернистую структуру. Уделяя большое внимание биологическому фактору, В.Р. Вильямс предположил, что внутри почвенных агрегатов анаэробные бактерии в процессе своей жизнедеятельности образуют специфическое органическое вещество («свежий почвенный гумус»), а на поверхности агрегатов происходят аэробные процессы (Шеин, 2005). Это предположение стало основанием гипотезы о водоустойчивости и механической прочности агрегатов, значительную роль в которой играют амфифильные свойства гумусовых веществ (Шеин, 2005). В анаэробных условиях образуются гидрофобные компоненты, в аэробных – гидрофильные,

способные мигрировать с током влаги и вступать во взаимодействия с элементарными почвенными частицами.

Six и др. (2004) и Lehmann и др. (2007) в своих работах предоставляют подробный исторический обзор исследования агрегации почв зарубежными учеными. Основываясь на более ранних результатах (Sideri, 1936), Emerson (1959) и Edwards и Bremner (1967) предположили, что органо-минеральные микроагрегаты (20-250 мкм) образуются при взаимодействиях поливалентных металлов и органических лигандов с минеральными поверхностями (Lehmann и др., 2007). Quirk (1950) продвинул исследование стабильности микроагрегатов в воде, в то время как Greacen и Huon (1952) сравнивали насыщенные Са и Na агрегаты и их стабильность, и показали, что присутствие ионов Са приводит к более устойчивым агрегатам, а ионы Na усиливают набухание, образуя неустойчивую структуру. Oades (1984) видоизменил концепцию иерархии агрегатов, предполагая образование микроагрегатов внутри макроагрегатов. Благоприятные условия для агрегации почвы будут зависеть от гранулометрического состава почвы, содержания органического углерода, содержания влаги, насыщения агрегатов различными ионами, рН среды, процессов усадки и набухания. Природа и сила связывания органо-минеральных взаимодействий зависят от типа (Kaiseretal., 2002) и площади поверхности минеральных частиц (Kaiserand, Guggenberger, 2003). Формирование почвенной структуры является результатом многократных процессов набухания и усадки вследствие переувлажнения и иссушения (Horn и Smucker, 2005).

1.6. Водоудерживающая способность почв

Процесс структурообразования в почве невозможен без почвенной влаги. Гидрофизические и связанные с ними механические и реологические свойства почв зависят от особенностей структуры почв и отражаются в кривых водоудерживания, которые можно использовать для определения

важнейших агрофизических и гидромелиоративных характеристик (Воронин, 1984).

А.Д. Ворониным (1984, 1990) выделено 5 критических потенциалов – предельных состояний равновесия, через которые проходит почва при изменении содержания влаги. Они связаны с изменением соотношения между силами, действующими на воду в почве, молекулярными и электростатическими силами, исходящими от ее твердой фазы.

Влагу до I критического потенциала А.Д. Воронин (1980) характеризует как адсорбированную прочносвязанную. Второе предельное состояние равновесия наступает при влажности, когда толщина водной пленки увеличивается до тех пор, пока не достигнет устойчивой толщины, обусловленной совместным действием дисперсионных и электростатических сил. Воронин предполагает, что в области между I и II критическими потенциалами находится пленочная рыхлосвязанная влага. В области II критического потенциала находятся значения влажности соответствующие величинам влажности влаги завядания и влажность предела усадки почв.

III критический потенциал на кривой основной гидрофизической характеристики соответствует такому количеству влаги, при котором влага из толстых пленок частично перетекает под мениски до тех пор, пока не установится равновесие между ее толщиной и кривизной сосуществующих с ней менисков. При переходе через это критическое состояние в случае сушки происходит нарушения сплошности заполненного водой основного объема пор, что приводит к «разрыву» капиллярной связи между различными участками воды в значительной части объема пустот почвы. Рассматриваемому критическому потенциалу соответствует влажность разрыва капилляров, при достижении которой почва начинает вести себя как хрупко-упругое тело.

В случае увлажнения происходит слияние менисков, уменьшаются контракционные силы, силы сцепления ослабевают, резко увеличивается площадь контактных менисков, что приводит к возможности смещения

частиц относительно друг друга без нарушения связи между ними. С рассматриваемой областью связаны резкое изменение прочности почвы в зависимости от влажности переход почвы из твердообразного упруговязкого состояния в или из полутвердой консистенции в пластичную при увлажнении.

В своей работе А.Д. Воронин (1984) подчеркнул, что оптимальные условия для образования прочных агрегатов более или менее округлой формы складываются в области перехода пленочно-капиллярной влаги в пленочно-стыковую. Свободная энергия поверхности раздела вода - воздух при влажности, близкой к влажности III критического потенциала в основном еще определяется площадью поверхности пленки, которая при перемешивании и рыхлении почвы почвообрабатывающими орудиями стремится принять вместе с почвенными частицами форму с наименьшей поверхностью, т.е. шарообразную, и поэтому почва распадается на агрегаты более или менее округлой формы. Этот механизм формирования почвенных агрегатов действует и при более низких влажностях. Однако с понижением влажности размер образуемых агрегатов уменьшается, что и сказывается на плотности упаковки почвенных частиц. Плотность упаковки возрастает и при влажностях выше, чем влажность III критического потенциала так как в этих случаях почвенные частицы, получая возможность скольжения относительно друг друга, реализуют основную тенденцию дисперсных сил - стремление к возможно плотной упаковке. Сокращение же площади пленок приводит к тому, что они уже не в состоянии сформировать агрегаты зернистой формы, и поэтому при рыхлении и перемешивании почвенная масса распадается на довольно крупные и плотные комки и глыбы, не оказывающие существенного влияния на упаковку. Отсюда следует, что самую низкую плотность упаковки почвенных частиц можно ожидать при влажности образования агрономически ценных агрегатов. Автор предполагает, что при этой влажности также складываются оптимальные для механической обработки почвы условия.

Область IV критического состояния соответствует области преобладания капиллярных сил. К области IV критического состояния относится наименьшая влагоемкость. При этой влажности происходит смена капиллярно-сорбционного механизма удержания воды на капиллярный, поэтому ее можно назвать максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкостью. А.Д. Воронин (1984) показал, что нарушение естественной структуры почвы сказывается на структурно-функциональных гидрофизических и механических свойствах только при влажностях выше максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкости. При влажностях ниже этой величины заметного влияния на кривую водоудерживаемости и структурно-функциональные свойства нарушение структуры не оказывает.

V критическое состояние Воронин определял, как предельное равновесие между менисками с отрицательной кривизной, плоской пленкой и гравитационными силами. При увлажнении выше влажности V критического потенциала, гравитационные силы начинают преобладать над капиллярными и почва переходит в состояние текучести.

Как подчеркнул А.Д. Воронин (1990), категории почвенной влаги расширяют представления о природе почвенной влаги и в ряде случаев могут помочь точнее понять поведение воды в почве. Им предложена следующая классификация категорий почвенной влаги:

- адсорбированная прочносвязанная (до I критического состояния,);
- пленочная рыхлосвязанная (стыковая) (между I и II);
- пленочная свободная (между II и III);
- капиллярно-пленочная (между III и IV);
- капиллярная (после IV состояния)

Выделение категорий почвенной влаги и, в особенности, областей перехода между ними имеет не только практическое значение, но и позволяет объединить структуры почвы и энергетику содержащейся влаги с функциональными физическими и механическими свойствами почв в единой концепции.

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): *Haplic chernozem (rachic)*), 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.

Объекты располагаются в средней части лесостепной полосы Средне-Русской возвышенности в бассейне р. Сейма к югу от Курска.

Территория расположена в пределах Воронежского кристаллического щита – древнего массива, сложенного гранито-гнейсами, кристаллическими сланцами, железистыми кварцами. На дневную поверхность эти породы не выходят, а служат фундаментом для осадочных пород, которые представлены преимущественно глинами с редкими прослоями мергелей, известняков, песчаников и песков (120-140м). Выше располагаются юрские глинистые осадки, над которыми лежит толща меловых отложений,

состоящих в верхней и нижней части из песков, а в средней из глин, мела и мергелей. Выходы последних часто можно наблюдать в обнажениях по склонам коренных берегов и долинам рек.

Рельеф местности типично эрозионный. Разновысотные водораздельные увалы различной длины и формы рассечены оврагами и балками. Поверхность водоразделов обычно несколько выпуклая. Разница высотных отметок днищ балок и водоразделов достигает 100 метров. В местах с близким залеганием меловых отложений отмечаются карстовые явления в виде воронок, ям, провалов. Водораздельные пространства имеют хорошо выраженный блюдчато-бугорчатый рельеф. Современная эрозия в условиях природного ландшафта выражена слабо.

Почвообразующие породы представлены лессовидными суглинками, которые имеют двучленное сложение. Верхний нанос, с которым и совмещается большая часть почвенного профиля, представлен тяжелым пылеватым суглинком. Он имеет довольно однородный механический состав и не слоист. На глубине около 2-3 м и больше тяжелый лессовидный нанос подстилается средним пылеватым суглинком, в котором иногда наблюдается слоистость.

Территория располагается в полосе умеренно-холодного климата. Среднегодовая температура воздуха - около 5°C. Самые холодные месяцы - январь и февраль (около -9°C), самые теплые - июнь, июль, август (+18-19 °C). Средняя годовая температура почвы – 7,8°C. Резкий подъем температуры наблюдается от марта к апрелю, наибольшее падение имеет места от октября к ноябрю. Территория находится в зоне умеренного увлажнения.

Средняя многолетняя сумма осадков по Курску составляет 581 мм с колебаниями от 360 до 800 мм. Испаряемость за год в районе исследования равна 636 мм. Годовой коэффициент увлажнения Высоцкого-Иванова равен 0,89. Водный режим – периодически-промывной (Афанасьева, 1966)

Сопоставление средних многолетних данных, характеризующих режим влажности и водный баланс типичных черноземов Курской области в

периоды различного атмосферного увлажнения и температурного режима (с 1947 по 2006 г.) показало, что произошло увеличение увлажненности трехметровой толщи черноземов. Изменение климата вызвало сукцессию древесно-кустарниковой растительности. Отмечено увеличение случаев глубокого и сквозного промачивания черноземов при их периодически-промывном режиме (вплоть до сквозного промачивания почв, в том числе и летними осадками). В условиях возделывания сельскохозяйственных культур (монокультуры озимой пшеницы) корнеобитаемый слой 0-160 см в последние десятилетия также имел максимальную влагозарядку за холодное полугодие (Базыкина, Бойко, 2008; Базыкина, 2010; Базыкина, Бойко, 2010; Базыкина, Овечкин, 2011)

По содержанию гумуса в поверхностных слоях и по профилю, а также по распределению карбонатов в почве старопахотные мощные типичные черноземы Средне-Русской возвышенности приобрели черты сходства с мицеллярными черноземами более теплых провинций.

Содержание гумуса в верхних 10 см почвы целинных типичных черноземов колеблется в незначительных пределах – около 10% (Афанасьева, 1966). Содержание гумуса в пахотном слое многолетней пашни колеблется в небольших пределах – около 6%, по гранулометрическому составу почвы относятся к тяжелым крупнопылеватым суглинкам, плотность почвы небольшая и составляет 1.04 г/см³ (Длительные полевые опыты на черноземах Курской области России, 2010).

Смена растительности целинной степи режима абсолютного заповедования и водного режима черноземов в течение 34, а особенно 20 последних лет способствует изменению глубины залегания, количества и формы карбонатов, распределение по почвенному профилю гумуса, запасов зольных элементов, поступающих в почву в результате разложения растительных остатков, то есть их генетических признаков, свойств и плодородия (Базыкина, Бойко, 2008; Базыкина, 2010; Базыкина, Бойко, 2010; Базыкина, Овечкин, 2011). Средняя глубина залегания верхней границы

карбонатного горизонта составляет 110 см (Афанасьева, 1966) хотя она даже в течение года не остается постоянной. Эти сезонные передвижения верхней границы карбонатного горизонта происходят в черноземных почвах при неизменности общих условий и почвообразования и являются, таким образом, одним из элементов современного почвообразовательного процесса.

Верхняя граница карбонатного горизонта лежит наиболее глубоко от поверхности весной, летом она поднимается кверху, осенью опять опускается, но не достигает весеннего положения, а занимает во всех случаях среднее положение между весенним и летним. По данным Е.А. Афанасьевой углекислые соли в течение года мигрируют преимущественно в пределах верхней части карбонатного горизонта - от одной до двух третей его мощности (Афанасьева, 1964).

Большая часть Стрелецкого участка Центрально-Черноземного заповедника занята целинной разнотравно-луговой степью. К южной границе заповедника примыкают дубовые леса «Дедов-Веселый» и «Дубрашина».

30 апреля 1947 г. был распахан участок целинной разнотравно-луговой степи площадью 0,6 га. До распашки этот участок Стрелецкой степи использовался как сенокосное угодье. Паровой участок расположен на водораздельной поверхности в 200 м на северо-восток от усадьбы Центрально-Черноземного заповедника. Этот многолетний опыт был заложен А.Ф. Большаковым с целью сравнительного изучения водного режима мощных черноземов под целинными травостоями луговой степи, под пшеницей и при отсутствии растительности. Борьба с сорняками на паровом участке ведется путем регулярной культивации почвы и периодической вспашки на глубину 15-18 см.

Участок пашни находится в 9 км к юго-востоку от Курска. Прилегающая к нему лесополоса посажена на старопахотном поле в 1967 г.

В пахотном слое черноземов, используемых в сельском хозяйстве, увеличивается количество пылеватых частиц (0,25 мм) за счет разрушения агрегатов главным образом размера от 3 до 1 мм. Структура в подпахотном

горизонте заметно лучше, чем в пахотном. Под воздействием механической обработки структура распыляется и ухудшается. Хозяйственная деятельность человека не только изменяет состав и свойства пахотного слоя, она влияет и на почвенные процессы, в результате чего с течением времени меняется и строение профиля мощных черноземов. Черноземы использовались в сельском хозяйстве обычно без применения удобрений как органических, так и минеральных, поэтому изменения, произошедшие в гумусовом горизонте пахотных черноземов, обусловлены особенностями превращения органических веществ в севооборотах и отчуждением питательных веществ с урожаем (Афанасьева, 1966)

Ниже представлены описания разрезов почв некосимой степи, дубравы, лесополосы и пашни.

Описание разреза в некосимой степи:

Ad (0-5 см) - плотная дернина трав

A' (5-50 см) - темно-серый, тяжелосуглинистый, структура порошистая, мелкокомковато-зернистая, рыхлый, много корней.

A'' (50-140 см) - неоднородно окрашенный горизонт, буровато - палевый, кротовины, ходы червей, структура комковато - ореховатая, плотнее предыдущего, много псевдомицелия CaCO_3 , корни трав, граница неясная.

Bca (140 см и ниже) – светло - палевый, суглинистый, карбонатный горизонт, плотный, мелкопористый, ходы червей, структура непрочно-призматическая, мицелий, журавчики CaCO_3 .

Описание разреза в дубраве:

Разрез заложен на ровной, слабо наклонной к югу площадке /уклон ~ 1,5°/ снытьевой дубравы в урочище Дубрашина. Верхний ярус образован дубом, средняя высота которого 12-14 м, возраст ~ 50 лет. Второй ярус – черемуха и дикая яблоня. Кустарниковый ярус представлен редкими кустами

малины и терна. Травянистый покров хорошо развит – общее покрытие составляет 70-80%. Образцы были взяты из описанных ниже горизонтов.

А (10 – 15 см) - средний суглинок, темно-серый, рыхлый, хорошо и прочно оструктурен, комковато-зернистая, белесая присыпка, многочисленные включения корней трав, граница ровная, переход ясный.

АВ (50 – 55 см) - средний суглинок, неоднородно окрашен: буровато-темно-серый с диффузными бурыми пятнами, уплотненный, ореховато-комковатая с порошистостью, стенки трещин и корневых ходов покрыты тонкой блестящей темно-серой пленкой, на ее поверхности встречаются единичные прозрачные кварцевые зерна, незначительные включения корней, граница ровная, переход ясный.

Всa (140- 145 см) – тяжелый суглинок, буровато-палевый, плотный, пористый, непрочная глыбисто-призматическая структура, выражен максимум скопления карбонатов - псевдомицелий заполняет все видимые пустоты в мелкозем и покрывает стенки трещин усыхания, мелкие ржавые пятна до глубины 150 см, включения копролитов.

Описание разреза в лесополосе:

Верхний ярус образован дубом, кленом, ясенем.

Координаты: т.61 – С.Ш. 51°37,315'; ВД 036°15,708'; h над уровнем моря 219 м.

Апп (подподстилочный) (0-12) – хорошо выраженная однородная структура с агрегатами размером 0,5 см, темно-серый, рыхлый, сухой, грибной мицелий придает седоватость, агрегаты пронизаны мицелием, переход по плотности и оструктуренности.

А (12-35) – плотнее предыдущего, сухой, темно-серый, пронизан корнями, структура зернисто-комковатая, замечен грибной мицелий, переход по цвету и структуре.

АВ (35-65) – появляется буроватый оттенок, комковатая структура, плотный, переход по цвету и появлению карбонатного мицелия.

В1 (65-110) – появляется карбонатный мицелий, буро-палевый цвет преобладает, пронизан червороинами. Пятна, языковатые потеки более темного цвета, плотный, комковато-ореховатая структура.

ВС (>110) – переход по цвету, светлее предыдущего, более палевый, присутствует карбонатный мицелий, структура плохо выражена, червороины, лессовидный суглинок.

Глубина разреза 155 см

Описание разреза на пашне:

Координаты: т. 60 - С.Ш. 51°36,120'; В.Д. 036°13,393'; h над уровнем моря 212м

Ап1 (0-10-12 см) – очень рыхлый, порошистый, мелко-зернисто порошистый, сухой, темно-серый, после боронования или культивации.

Ап2 (10-12 – 30-32) – граница по плотности, плотнее и влажнее предыдущего, блестит на срезе, зернисто-комковатая структура, темно-серый, темнее предыдущего, корней почти нет.

А1 (30-32 – 65) – переход по плотности, рыхлее предыдущего, темно-серый, структура зернисто-комковатая, корней почти нет.

АВ (65-95) – граница неровная, обильные гумусовые потеки, по цвету неоднородный, на буро-палевом фоне гумусовые потеки, плотный, кротовины, граница неровная, переход по цвету.

В1 (95-110-130 – карбонатный мицелий, влажный, буро-палевый с гумусовыми потеками, структура порошистая, граница неровная по цвету.

В2 (110-130)-170 см – буро-палевый, более однородный по цвету, карбонатный мицелий, редкие пятна гумуса привнесенного с червороинами, порошистый влажный.

170 см – дно разреза.

Почвы имеют названия по классификации СССР 1977 года: черноземы типичные среднемощные тучные слабосмытые (черноземы типичные среднемощные среднегумусные слабосмытые для пахотных почв), по

классификации 2004 года: постлитогенные аккумулятивно-гумусовые черноземы и агрочерноземы миграционно-мицелярные карбонатосодержащие среднемощные тяжелосуглинистые на лессовидных суглинках, по классификации WRB (2006г): *voronic chernozem pachic*. Минералогический состав черноземов типичных представлен лабильными минералами на 46% и каолинитом с хлоритом на 31% (Соколова и др. 2005).

2.2. Методы исследования

2.2.1. Методы определения основных агрофизических свойств почв

Содержание общего углерода определено методом сухого сжигания на экспресс-анализаторе АН-7529. Гранулометрический анализ проводили методом лазерной дифракции размера частиц. 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, в котором реализован принцип термографического анализа (Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д. и др., 2011). Удельную поверхность и верхнюю часть основной гидрофизической характеристики (ОГХ) определяли методом десорбции паров воды над насыщенными растворами солей, нижнюю – методом центрифугирования на лабораторной центрифуге типа ЦЛС-3 (Смагин, 2007).

Прочность почвенной пасты определяется по глубине погружения металлического конуса с углом раскрытия 30° в почвенную пасту за определенное время (5 сек) при заданных влажности и нагрузке (0,15 кг) на ручном пенетрометре (Хайдапова, 2007). Принцип метода состоит в том, что под действием нагрузки металлический конус внедряется в почвенную пасту, при этом происходит сдвиг почвенных частиц относительно друг друга и в зависимости от сил межчастичного взаимодействия погружение конуса

происходит на ту или иную глубину, которая измеряется. С помощью ручного пенетromетра получено 4 значения прочности (в 3-х кратной повторности), соответствующих 4-м различным уровням влажности. 1 –я влажность соответствует влажности предела пластичности, которую контролировали конусом Васильева. Далее влажность образца уменьшали добавлением приблизительно 5 г воздушно-сухой почвы. Из оставшейся почвы определяли нижнюю границу пластичности (предел пластичности) методом раскатывания в шнур (Вадюнина, Корчагина, 1973) Полученные экспериментальные данные в программе STATISTICA аппроксимированы

степенным уравнением вида $y = \left(\frac{x}{b2}\right)^{-b1}$, где в качестве функции использовать прочность, а аргумента – влажность почвы;

С помощью программы STATISTICA определена прочность при влажности предела пластичности (Сидорова и др., 2012).

2.2.2. Метод исследования реологических свойств почв

Реологические параметры определяли методом амплитудной развертки в осцилляционном режиме с измерительной системой параллельных плато на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия) (рис.1).

Теория метода амплитудной развертки

Метод амплитудной развертки заключается в том, что образец подвергают осциллирующим напряжениям или деформации. Испытания с осциллирующими напряжениями часто называют динамическими (Шрамм, 2003; Mezger, 2011). При динамических испытаниях получают данные о вязкой и упругой реакциях образца в зависимости от скорости воздействия на него, или зависимость осциллирующего напряжения, или деформации от заданной угловой скорости или частоты (Шрамм, 2003)

Суть метода заключается в том, что образец почвы помещается между двумя плато, верхнее плато подвергается колебаниям с расширяющейся

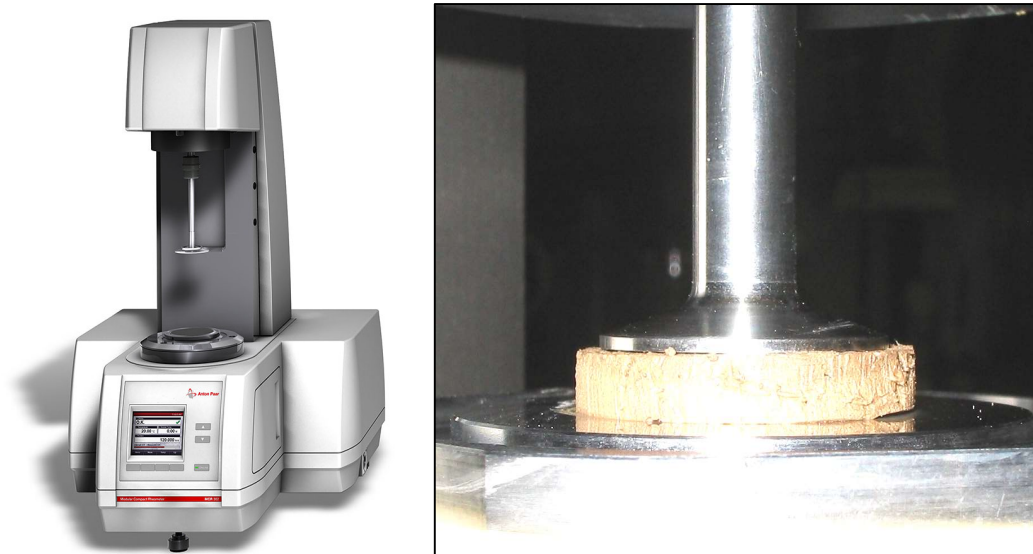


Рис.1. Модульный реометр MCR – 302 с измерительной системой параллельных плато

амплитудой с заданной частотой (Mezger, 2011). На рис. 2. расстояние h между пластинами является областью сдвига.

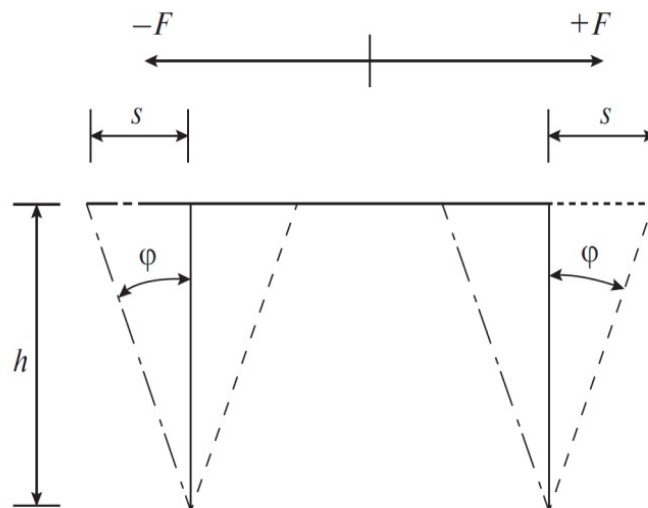


Рис. 2.Осцилляционный метод: сила сдвига $\pm F$, расстояние отклонения $\pm s$ и угол отклонения $\pm \varphi$ в зазоре между пластинами h (по Metzger,2011).

Когда колесо вращается, верхняя пластина производит сдвиг вперед и назад с усилием сдвига $\pm F$. Движение верхней пластины вызывает сдвиг образца, который помещен между этими двумя пластинами, показывая путь

отклонения $\pm s$ и угол отклонения $\pm\varphi$. Напряжение сдвига τ равно силе F , деленной на площадь пластины A , $\pm\tau [\text{Па}] = \pm F/A$, и деформация $\pm\gamma = \pm s/h = \pm \tan\varphi$, где s – расстояние отклонения, h – расстояние между двумя плато. Как показано на рис. 3, движение верхней пластины вызвано вращением двигателя колеса.

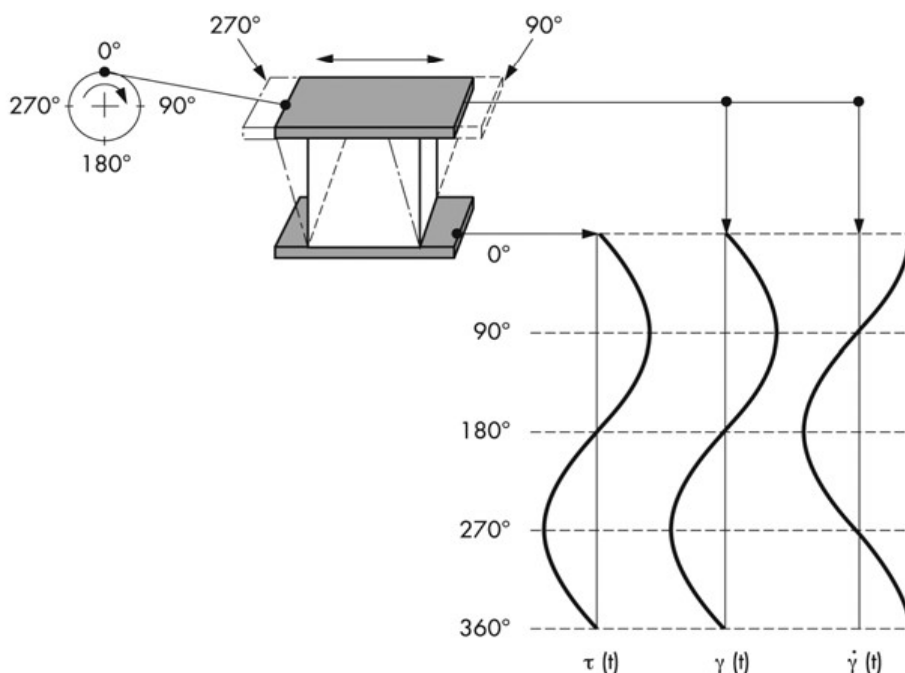


Рис. 3. Двухпластинная модель в осцилляционном методе; идеально упругое поведение: функции с временной зависимостью $\tau(t)$, $\gamma(t)$ и $\dot{\gamma}(t)$ в форме синусоидальных и косинусоидальных кривых (по Metzger, 2011).

Результирующая сила измеряется на нижнем плато. При полном обороте угол вращения составляет 360° . Это соответствует полному циклу колебаний функций с временной зависимостью $\tau(t)$, $\gamma(t)$ или $\dot{\gamma}(t)$ соответственно. Во время непрерывного вращения, когда колесо передает угловые положения 0° или 180° , верхняя пластина показывает нулевое положение, поэтому $\gamma(t) = 0$ и $\tau(t) = 0$. Однако скорость здесь в максимуме, то есть $\dot{\gamma}(t) = \max$. В угловом положении 90° верхняя пластина показывает максимальное отклонение направо, соответственно в 270° происходит максимум отклонения налево. Поэтому здесь $\gamma(t) = \gamma_{\max}$ и $\tau(t) = \tau_{\max}$ или $\gamma(t) = -\gamma_{\max}$ и $\tau(t) = -\tau_{\max}$ соответственно. Скорость при этом равна нулю, то есть $\dot{\gamma}(t) = 0$, в этой точке

движение полностью изменяется. При $G^* = \tau(t)/\gamma(t) = \text{const}$, $\tau(t)$ – кривая всегда в фазе с $\gamma(t)$ -кривой, то есть обе кривые идут синхронно в форме синусоидальных кривых. Формально деформация может быть представлена как где γ_A – амплитуда деформации, %; ω – угловая частота, рад/с или с^{-1} . Амплитуда измеряется от основной нулевой линии до пика только на одной стороне синусоидальной кривой. Частота осцилляции может быть представлена двумя путями: как угловая частота ω (рад/с или с^{-1}) или как частота f (Гц). Эти две частоты связаны следующим уравнением: $\omega = 2\pi f$, например, $f = 10$ Гц соответствует $\omega = 62.8$ рад/с или 62.8 с^{-1} . Для образцов, показывающих идеально упругое поведение, нет отставания между $\gamma(t)$ и $\tau(t)$ -кривыми, то есть нет сдвига фаз, угол сдвига фаз $\delta = 0^\circ$. В случае идеально вязкого поведения $\gamma(t)$ кривая имеет вид синусоидальной кривой, кривые $\tau(t)$ и $\dot{\gamma}(t)$ – косинусоидальные. Для образцов, показывающих идеально вязкое поведение, существует отставание между $\tau(t)$ -кривой и $\gamma(t)$ с углом сдвига фаз 90° . В большинстве случаев поведение бывает вязкоупругим. При заданной деформации γ : τ -кривая имеет синусоидную форму $\tau(t) = \tau_A \sin(\omega t + \delta)$ с углом δ фазового сдвига между заданной и результирующей кривыми. Угол δ обычно измеряется в градусах. Угол сдвига фаз всегда находится между 0° и 90° , $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$. Для идеально упругого поведения $\delta = 0^\circ$, для идеально вязкого поведения $\delta = 90^\circ$, для вязкоупругого поведения $0^\circ < \delta < 90^\circ$. При исследовании вязкоупругих материалов результирующая $\dot{\gamma} - \gamma(t) = \dot{\gamma} \sin \omega t$, $\dot{\gamma}$ – синусоида всегда будет показывать определенное отставание по сравнению с заданной кривой. Теоретические аспекты данного метода подробно изложены в руководстве по реометрии (Metzger, 2011).

Дадим краткую характеристику получаемых реологических параметров: модуля упругости, модуля вязкости, диапазона линейной вязкоупругости, предела текучести, как точку пересечения модулей, коэффициента потерь, интегральной зоны Z . Программное обеспечение реометра показывает величины модулей упругости и вязкости G' и G'' в виде табличных цифровых данных и виде графиков (рис. 4).

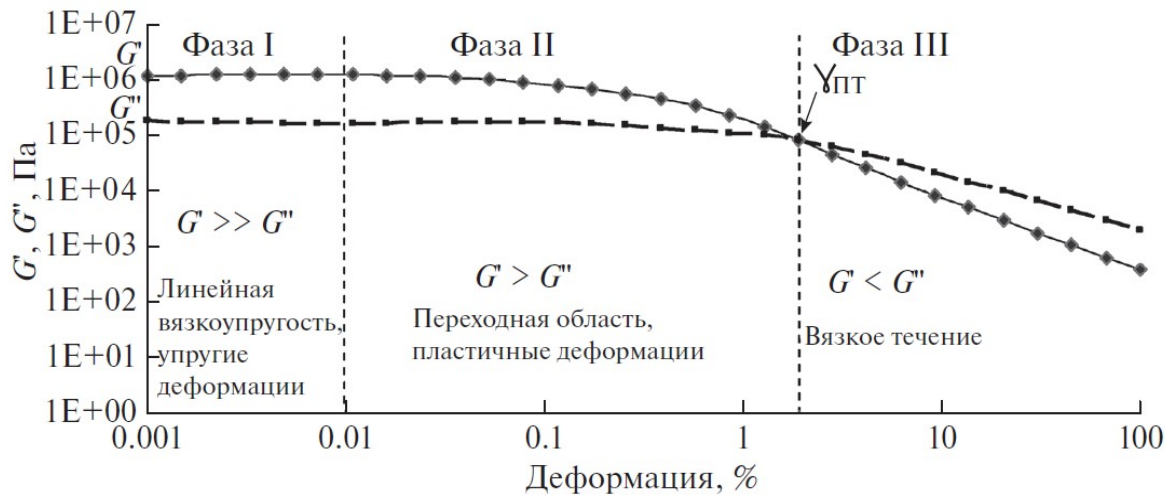


Рис. 4. Модуль упругости G' и модуль вязкости G'' чернозема целинного при влажности предела текучести.

Модуль накопления G' [Па] (Storage modulus) — является мерой энергии деформации, сохраненной образцом во время процесса сдвига. После снятия сдвигающего усилия эта энергия полностью сохраняется и выступает в качестве движущей силы для частичного или полного восстановления ранее полученной деформации структуры. Материалы, которые сохраняют энергию деформации полностью, показывают поведение полной обратимой деформации после снятия нагрузки и имеют неизменную форму. Таким образом, модуль накопления G' представляет упругое поведение материала, будем называть его модуль упругости.

Модуль потерь G'' [Па] (loss modulus) — является мерой энергии деформации, израсходованной во время процесса сдвига и потерянной для образца. Эта энергия потрачена на изменение структуры материала при частичном или полном течении образца. Течение или вязкоупругое течение означает относительное движение между молекулами, группами, частицами, агрегатами и другими компонентами структуры такими, как домены или кристаллы. Также существуют силы трения между этими компонентами, и как следствие происходит поднятие температуры, этот процесс называют «вязким нагреванием». Энергия во время процесса трения рассеивается, часть

ее тратится на нагрев образца, часть рассеивается в окружающую среду. Материалы, показывающие необратимую деформацию после цикла нагрузок, имеют измененную форму. Таким образом, модуль потерь G'' - представляет вязкое поведение испытуемого образца, будем называть его модуль вязкости.

Диапазон линейной вязкоупругости (linear viscoelastic (LVE) range). При маленьких амплитудах кривые модуля упругости G' и модуля вязкости G'' имеют область постоянных величин в виде плато (рис. 3), но в большинстве случаев на различных уровнях. Величина нагрузки, до которой соблюдается параллельный ход кривых, называется диапазоном (областью) линейной вязкоупругости.

Коэффициент потерь (damping factor) вычисляется как отношение модуля вязкости к модулю упругости и является тангенсом угла δ . Вязкоупругое поведение любых материалов состоит как из вязкого, так и упругого процесса. На рис. 5 вектор модуля упругости G' находится на оси x , вектор модуля вязкости G'' на оси y . G^* – сумма векторов или результирующая двух компонентов модуля упругости G' и модуля вязкости G'' , она характеризует полное вязкоупругое поведение, состоящее из обеих частей упругой и вязкой.

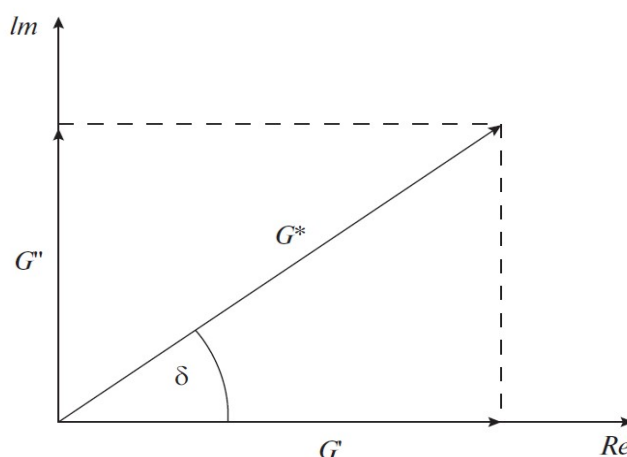


Рис. 5. Векторная диаграмма, показывающая модуль упругости G' и модуль вязкости G'' , их результирующую G^* и $\tan \delta$ (по Mezger, 2011)

Фактор потерь может быть выражен как отношение стороны противоположной углу δ к стороне прилежащей к углу δ , что является тангенсом угла δ : $\tan \delta = G''/G'$. Угол сдвига фаз и представляет собой $\tan \delta$. Условия различных типов поведения вещества представлены в табл. 1 (Metzger, 2011).

Интегральная зона Z. Для кумулятивной оценки диапазона устойчивости структурных связей предложено рассчитывать площадь интегральной зоны Z по величине коэффициента потерь, ограниченную с одной стороны начальной величиной амплитуды сдвига, с другой стороны $\tan \delta < 1$ (Markgraf, 2006).

Таблица 1.

Условия типов поведения веществ (по Metzger, 2011)

Идеально вязкое течение	Поведение вязкоупругой жидкости	Вязкоупругое поведение	Поведение вязкоупругого твёрдого тела	Идеально упругое поведение
$\delta = 90^\circ$	$90^\circ > \delta > 45^\circ$	$\delta = 45^\circ$	$45^\circ > \delta > 0^\circ$	$\delta = 0^\circ$
$\tan \delta \rightarrow \infty$	$\tan \delta > 1$	$\tan \delta = 1$	$\tan \delta < 1$	$\tan \delta \rightarrow 0$
$G' \rightarrow 0$	$G'' > G'$	$G'' = G'$	$G' > G''$	$G'' \rightarrow 0$

Структурная характеристика образца. Для анализа поведения образца следующие отношения могут быть использованы при описании свойств образца:

а) если $G' > G''$, то это твердообразное вещество, здесь упругость доминирует над вязкостью, образец показывает определенную жесткость, что свойственно структурированным системам и устойчивым пастам;

б) если $G' = G''$, то величины двух модулей сбалансированы, такое состояние часто называют пределом текучести, и оно показывает, что материал находится в пограничном состоянии между жидким и твердоподобным.

в) если $G'' > G'$, вязкое поведение доминирует над упругим. Образец показывает характер жидкости. В покое такие материалы обычно очень неустойчивы и текут со временем.

Структурная или реологическая характеристика образца осуществлялась по следующим основным параметрам (рис. 4):

1. Величина модуля упругости в начале эксперимента при самых малых амплитудах характеризует начальную прочность межчастичных связей исследуемого образца.

2. При маленьких амплитудах (фаза I, рис. 4) в области линейной вязкоупругости обе кривые G' и G'' имеют область постоянных величин в виде плато параллельных оси x . Эта область, ее наличие и диапазон свидетельствуют об устойчивости структурных связей в данном образце при заданных нагрузках.

3. Следующая переходная область (фаза II, рис. 4) от начала понижения кривых до их пересечения – область пластичных деформаций. В данной области вещество ведет себя как пластичное тело.

4. Точка пересечения модулей (фаза III, рис. 4) или равенство модуля упругости G' и модуля вязкости G'' свидетельствует о переходе образца из состояния вязкоупругого в вязкое состояние – область разрушения упругой составляющей образца.

5. Интегральная зона Z (фаза I и II, рис. 4) характеризует общую величину упругого и пластичного поведения до точки пересечения модулей. 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 А.Ф., Корчагина З.А. 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 с синхронной регистрацией массы образца и температуры влажности разрыва капилляров в процессе сушки при постоянной температуре 60°C. 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 Е.Ю., Хайдапова Д.Д. 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.

В данной работе исследовали вязкоупругие свойства черноземов типичных различного землепользования. Использовали метод амплитудной развертки в осцилляционном режиме с измерительной системой параллельных плато на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия) (Mezger, 2011).

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 $<10\text{Н}$. Эксперименты проводили в трехкратной повторности.

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 (таблица 2). 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 углерода в длительном пара 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 (Markgraf, W. и др, 2012). 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.

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 свидетельствует о том, что выращивание лесополос способствует

восстановлению органического запаса почв. Слои иллювиальных горизонтов исследуемых объектов характеризуются более низким содержанием углерода.

Таблица 2.

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

Угодье	С*, %	Гранулометрический состав						Содержание физ. глины, %	S**, м²/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

3.1.2. Гранулометрический состав

Во всех исследованных вариантах преобладающей фракцией является фракция крупной пыли. 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 (Таблица 2). 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 (таблица 2). Накопление органического вещества сопровождается увеличением общей удельной поверхности (Yukselen, Y. and Kaaya, A. 2006).

3.1.4. Агрегатный анализ

По данным сухого просеивания построены графики распределения агрегатов гумусированных горизонтов исследуемых вариантов по размерам (рис. 6).

В образцах степи, дубравы и лесополосы максимальное содержание агрегатов приходится на оптимальный размер 1 - 5 мм и составляет по 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.

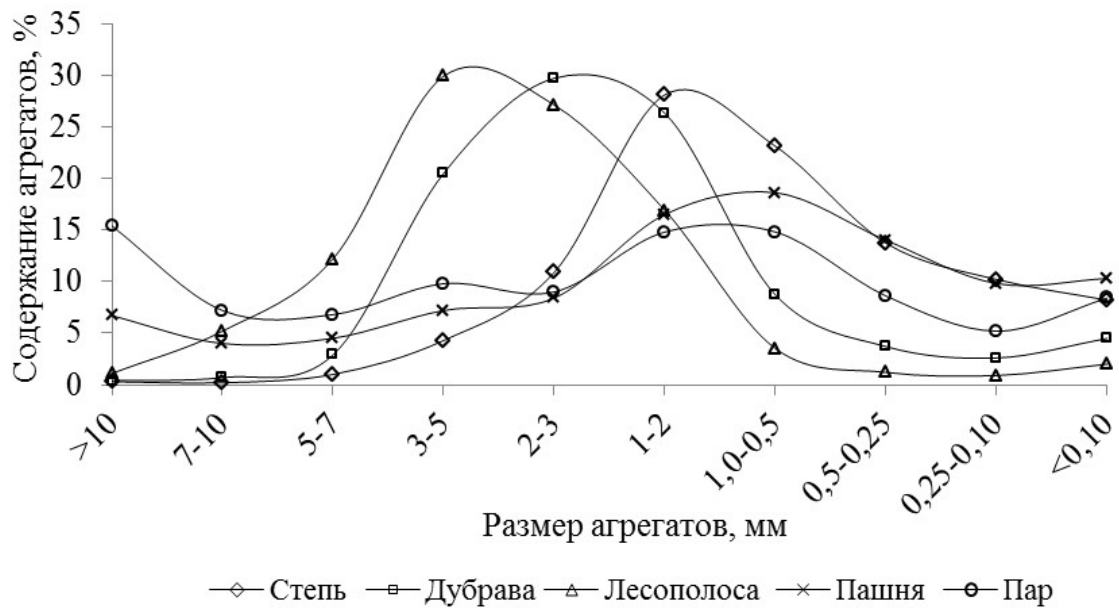


Рис.6. Распределение воздушно-сухих агрегатов по размерам

В пахотных почвах наблюдается увеличение содержания глыбистой и пылеватой 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 (Честнова, Хайдапова, 2015).

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 свидетельствует о различном качественном составе органического вещества, образованного из растительных остатков различных растительных сообществ.

Гистограмма распределения содержания водопрочных макроагрегатов по размерам (рис. 7), 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.

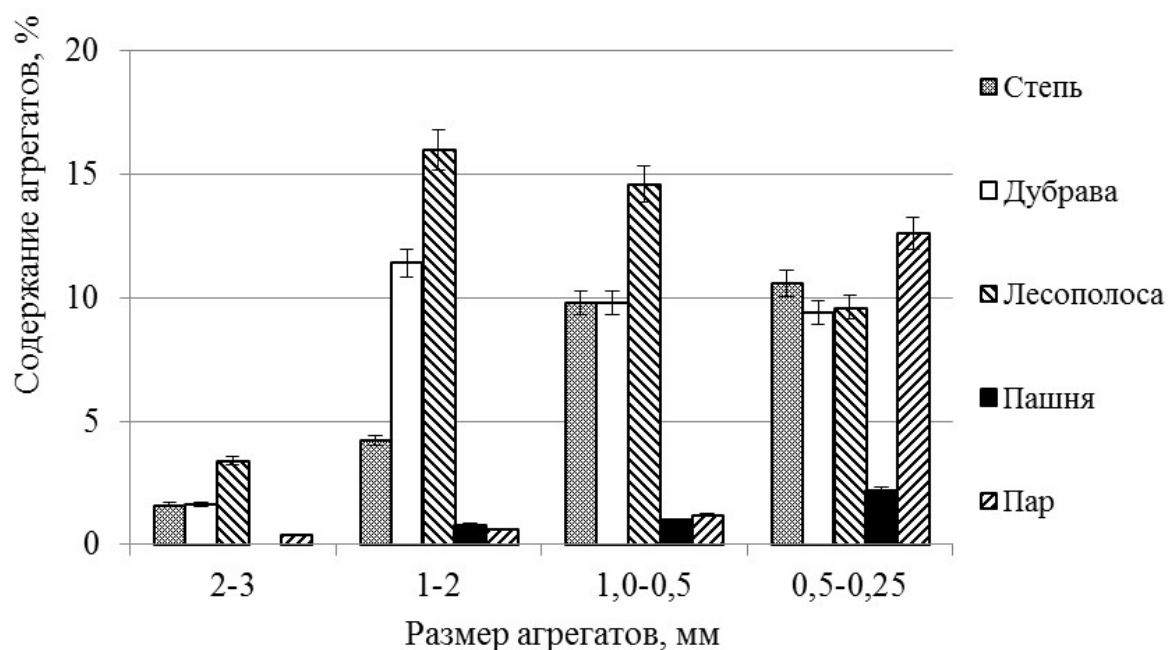


Рис. 7. Распределение водопрочных агрегатов по размерам

3.2.4. 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 (таблица 3). Коэффициент корреляции между набуханием и содержанием углерода составляет 0,95 и свидетельствует о тесной связи этих величин.

Таблица 3.

Степень набухания гумусированных горизонтов объектов исследования.

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

3.2.5. Кривые сушки

Определение зависимости скорости сушки от влажности почвенного образца проводили с помощью анализатора влажности МХ-50 (Япония), в котором реализован принцип термографического анализа. Почвенный образец в виде пасты увлажненной до состояния предела текучести помещали в пластмассовую чашку Петри диаметром 4 см и толщиной 4 мм, чем достигали однообразие исследуемых образцов по площади испарения и толщине. Внутри почвенного образца помещали температурный датчик «Термохрон». Высушивание образца проводили при $t = 60^{\circ}\text{C}$. Фиксация температуры и влажности образцов проводились синхронно с интервалом в минуту (приложение 1). Результатом стали зависимости скорости сушки и температуры образцов от влажности (рис. 8).

По своему виду они соответствуют кривым, описанным А.В. Лыковым (1968). 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.4). В диапазоне постоянной скорости сушки (температуры) вероятно, испаряется капиллярная влага.

Диапазон капиллярной влаги соответствует значениям от W_{k1} до W_{k2} (%). Наибольшая величина диапазона постоянной скорости сушки вариантов некосимой степи, дубравы и лесополосы свидетельствует о большем содержании органического вещества в этих образцах. В своих работах А.Д. Воронин (1984, 1990) особое внимание уделил такому критическому потенциалу влаги, при котором вода из толстых пленок частично перетекает под мениски до тех пор, пока не установится равновесие между кривизной сосуществующих с ней менисков и ее толщиной. При переходе через это критическое состояние в случае сушки сплошность заполненных водой

капилляров нарушается, а рассматриваемому критическому потенциалу соответствует влажность разрыва капилляров, при достижении которой почва начинает вести себя как хрупко-упругое тело.

При переходе от области постоянной скорости сушки к области падающей скорости сушки или от области постоянной температуры к повышению температуры происходит смена формы влаги, вероятно влага капиллярная сменяется пленочной, возможно эта область представляет собой влажность разрыва капилляров.

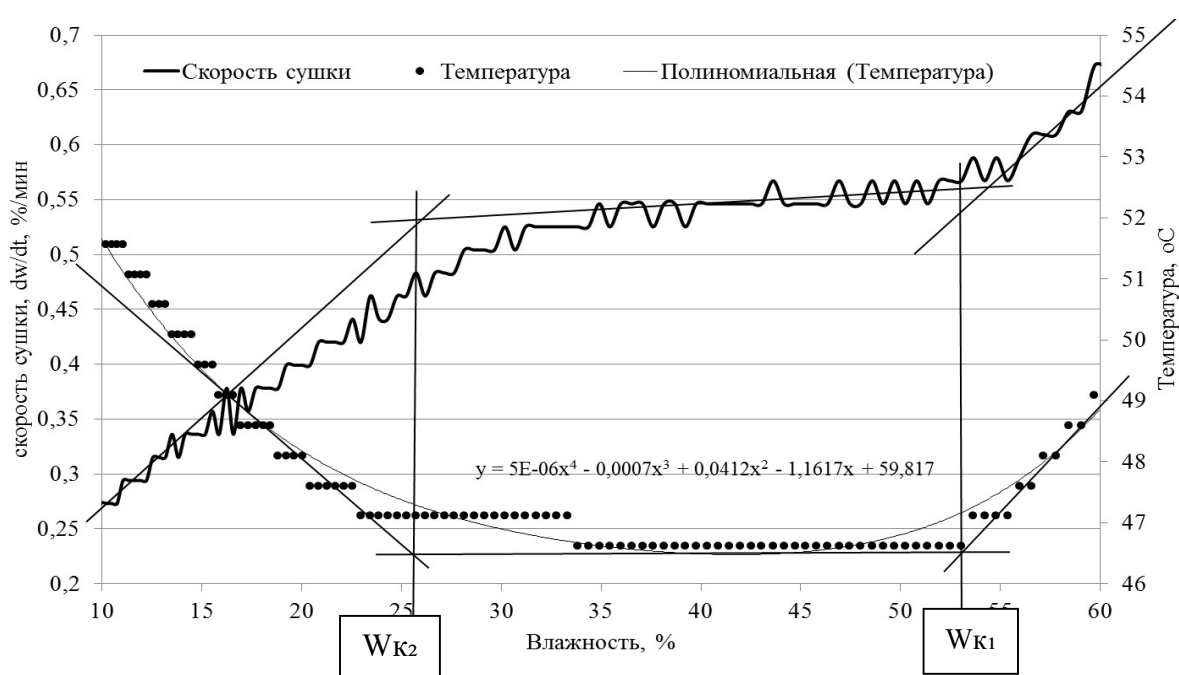


Рис. 8. Температурная кривая и кривая скорости сушки на примере гумусированного образца степи

Таблица 4.

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

3.2.6. Основная гидрофизическая характеристика

В результате определения основной гидрофизической характеристики получены зависимости капиллярно-сорбционного давления почвенной влаги от влажности (рис. 9-11). Полученные экспериментальные данные аппроксимированы по уравнению Ван-Генухтена (Van Genuchten и др., 1980 1991), а также методом кусочно-линейной аппроксимации (Никитин В.И, 2016).

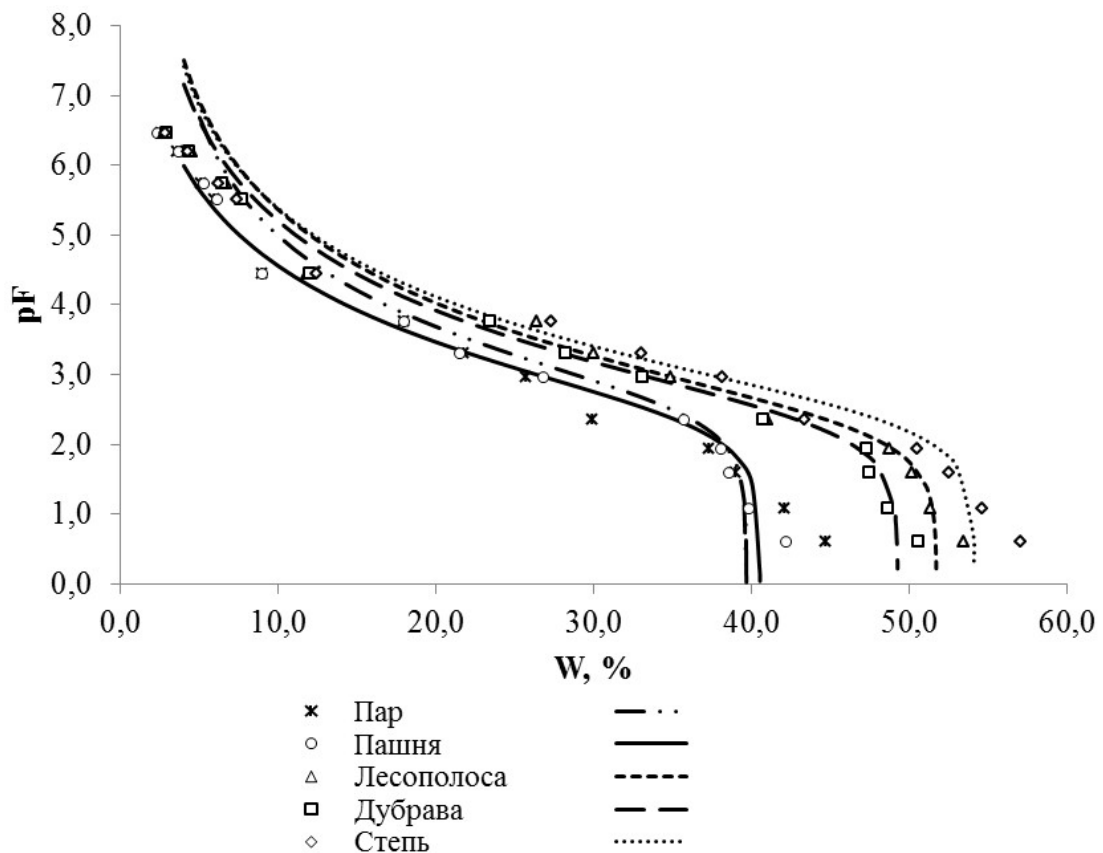


Рис.9. Основная гидрофизическая характеристика гумусированных слоев исследуемых почв (аппроксимация по уравнению Ван-Генухтена)

Первый метод аппроксимации в данном случае позволяет исследовать водоудерживающую способность почв во всем диапазоне влажности, второй – изучить более детально отдельные участки. В таблице 5 представлены уравнения линейных функций и коэффициенты корреляции с экспериментальными данными. Для всех исследуемых вариантов коэффициент корреляции $>0,92$, а в 80% случаев, близок к 0,99.

Из рис. 9 видно, что наилучшей водоудерживающей способностью обладают гумусированные слои почв некосимой степи, худшей – пахотные почвы, промежуточное положение занимают почва дубравы и лесополосы.

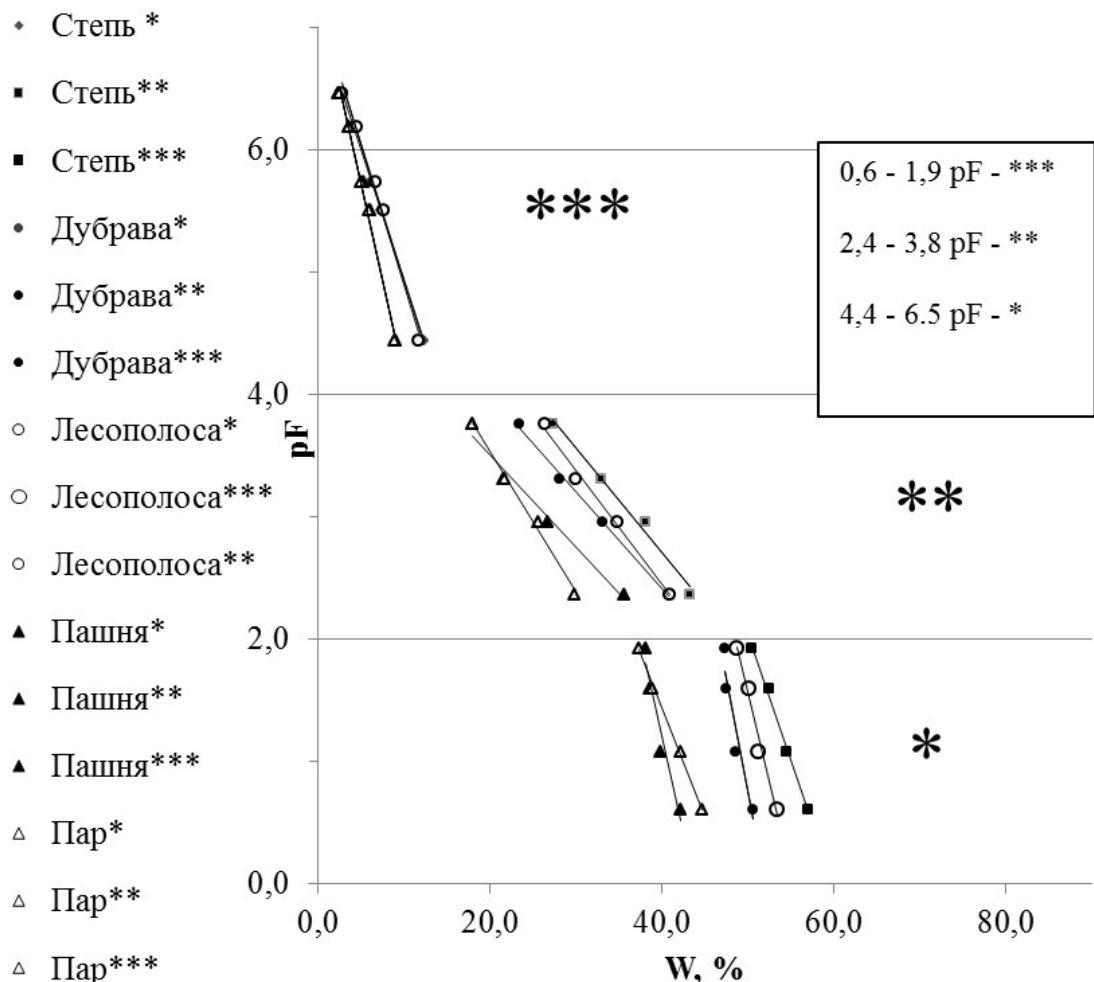


Рис.10. Основная гидрофизическая характеристика гумусированных слоев исследуемых почв (аппроксимация кусочно-линейным методом)

Таблица 5.

Уравнения аппроксимации и коэффициенты корреляции кусочно-линейным методом

Вариант	pF					
	0,6 - 1,9		2,4 - 3,8		4,4 - 6,5	
	Уравнение	R ²	Уравнение	R ²	Уравнение	R ²
Степь	$y = -0,2068x + 12,391$	0,996	$y = -0,0852x + 6,1137$	0,987	$y = -0,213x + 7,0845$	0,999
Дубрава	$y = -0,3674x + 19,108$	0,922	$y = -0,0794x + 5,5873$	0,998	$y = -0,2223x + 7,164$	0,996
Лесополоса	$y = -0,2953x + 16,327$	0,981	$y = -0,0923x + 6,1478$	0,993	$y = -0,2272x + 7,1887$	0,999
Пашня	$y = -0,3131x + 13,708$	0,948	$y = -0,0757x + 5,0278$	0,982	$y = -0,3175x + 7,3271$	0,996
Пар	$y = -0,179x + 8,5929$	0,999	$y = -0,1142x + 5,8185$	0,993	$y = -0,3175x + 7,3272$	0,996

Для более детального изучения основной гидрофизической характеристики гумусированных горизонтов рассмотрим рис. 10. Линейные функции аппроксимации данных разделились на 2 группы: пахотных почв и почв лесной и степной растительности. Это свидетельствует о худшей водоудерживающей способности почв сельскохозяйственных угодий. Причем в сорбционной области влаги различия между вариантами минимальные, а в группе пахотных почв их и вовсе нет – уравнения совпадают.

В диапазонах 0.6-1,9 и 2,4-3.8 pF в каждой группе различия более заметны. Распределение водоудерживающая способность почв по вариантам следующее: пар $\approx$ пашня < дубрава < лесополоса < степь.

Исследование основной гидрофизической характеристики нижних слоев исследуемых почв (рис. 11) указывает на лучшие водоудерживающие

способности почвы некосимой степи. Основная гидрофизическая характеристика почвы дубравы на совмещенном графике занимает положение слева, что свидетельствует о более слабой водоудерживающей способности этого объекта исследования.

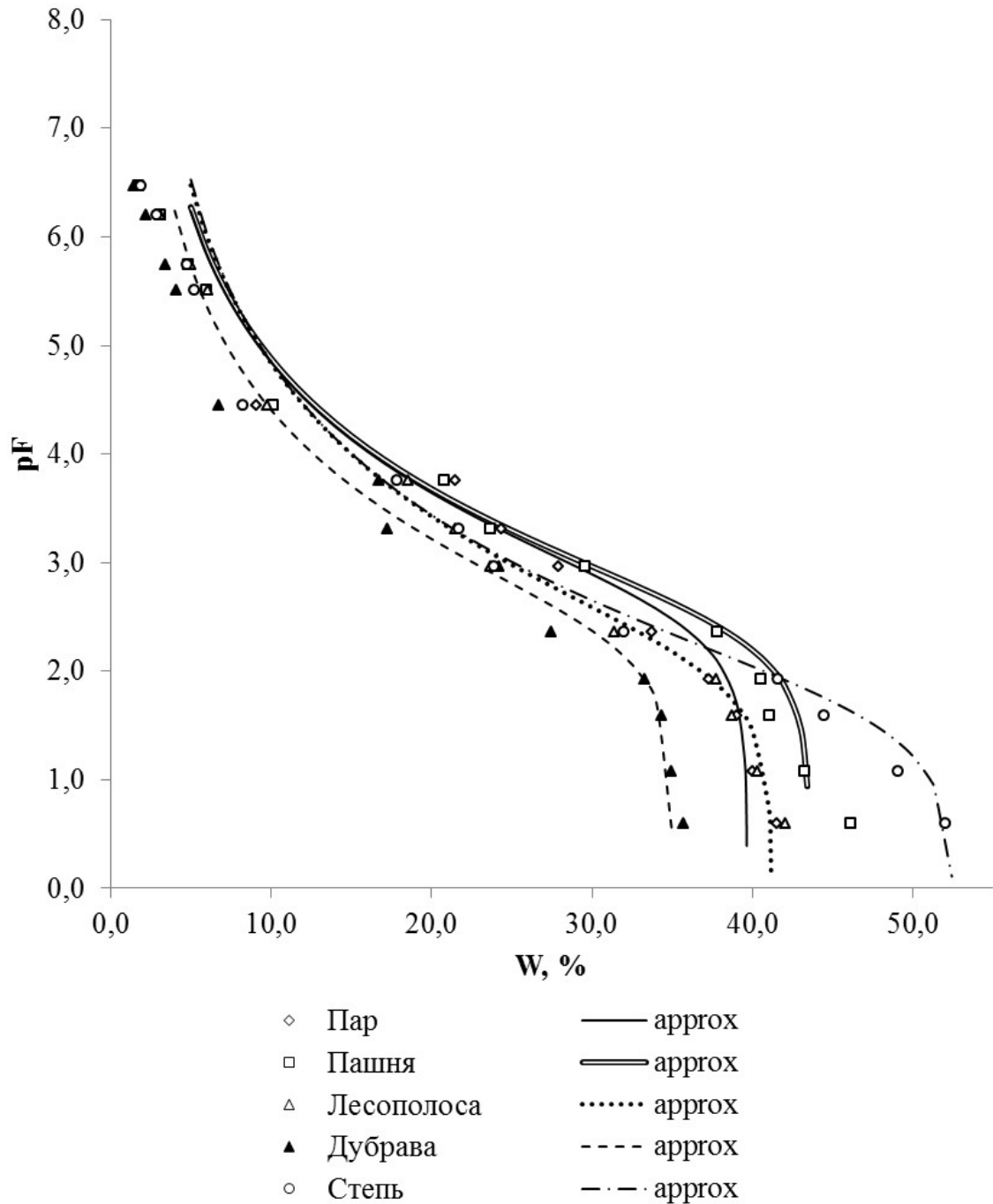


Рис. 11. Основная гидрофизическая характеристика иллювиальных слоев почв (аппроксимация по уравнению Ван-Генухтена)

3.2.7. Прочность почвенных паст

Результатом исследований на ручном пенетрометре стали зависимости прочности почвенной пасты от влажности (рис. 12). Из графика зависимости прочности почвенной пасты от влажности видно, что кривые вариантов дубрава, некосимая степь, лесополоса находятся в области более высоких влажностей, что говорит о более прочных межчастичных связях, по сравнению с вариантами пашня и чистый пар.

Прочность почвенных связей в почве, находящейся под лесным массивом (дубрава) в диапазоне влажности от предела текучести до предела пластичности увеличивается в 16 раз. График зависимости прочности почвенной пасты от влажности в данном случае имеет перегиб при влажности 53,7 %. Это обусловлено более плотной упаковкой почвенных частиц при меньших влажностях и, соответственно, более интенсивным процессом межчастичного взаимодействия.

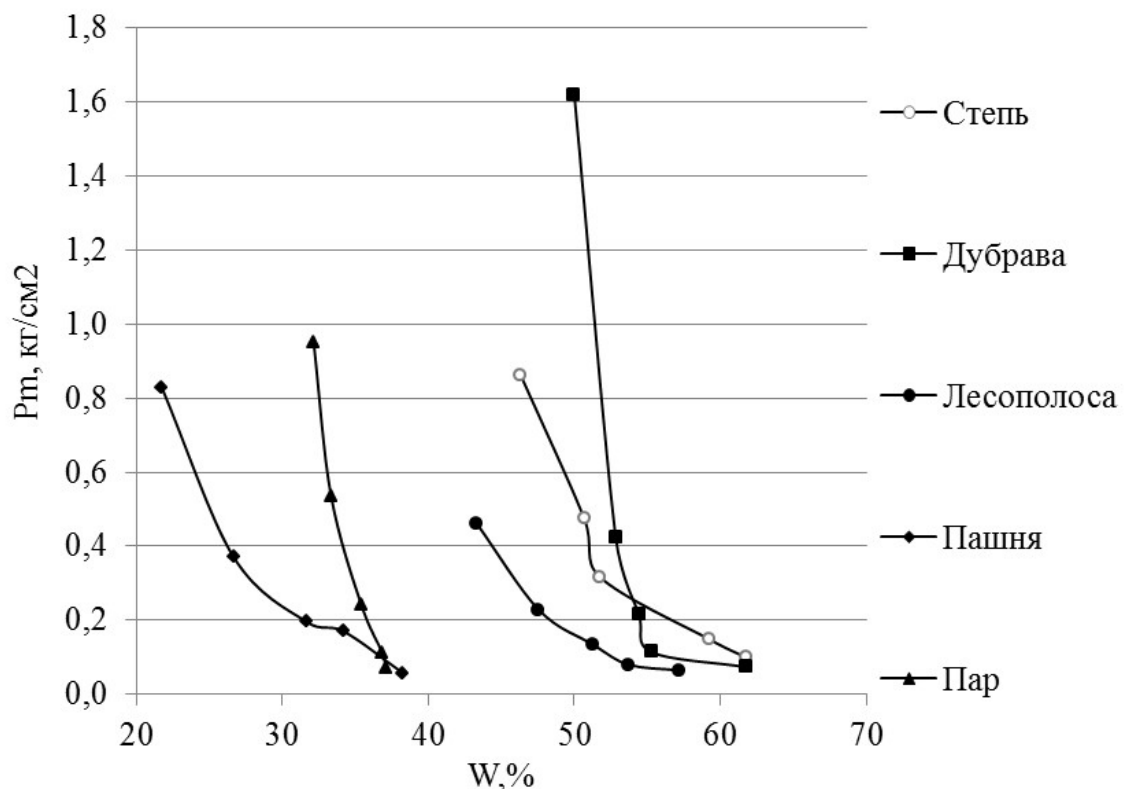


Рис. 12. График зависимости прочности почвенной пасты от влажности.

В диапазоне влажности от предела текучести до предела пластичности прочность связей чернозема некосимой степи и лесополосы увеличивается в 9 и 5 раз соответственно (табл. 6). В варианте дубрава прочность при влажности предела пластичности практически в 2 раза больше чем в почве некосимой степи и в 3,5 раза больше чем в почве под лесополосой. Это объясняется уменьшением содержания органического вещества в ряде почв: дубрава – некосимая степь – лесополоса (рис. 12). Упрочнение связей в почве под лесополосой по мере уменьшения влажности происходит постепенно (кривая зависимости более пологая). Промежуточное значение занимает кривая зависимости прочности от влажности почвы некосимой степи.

Таблица. 6.

Влажности предела текучести и предела пластичности и, соответствующие им прочности.

Угодье	Влажность предела текучести $W_{пт}, \%$	Влажность предела пластичности и $W_{пп}, \%$	Прочность P_m при $W_{пт}, \text{кг/см}^2$	Прочность P_m при $W_{пп},$ кг/см^2
Степь	61,8	46,3	0,1	0,9
Дубрава	61,8	50,0	0,1	1,6
Лесополоса	57,1	43,3	0,1	0,5
Пашня	38,2	21,7	0,1	0,8
Пар	37,1	32,1	0,1	1,0

Графики зависимостей прочности пашни и чистого пара от влажности находятся в области более низких значений влажности, что свидетельствует о меньшем содержании органического вещества, а также показывает худшее физическое состояние почв. Прочность почвенных связей при влажности паст от предела текучести до предела пластичности увеличивается в почве сельскохозяйственной пашни в 8 раз, а в почве пара в 10 раз. Оба графика

зависимости прочности почвенной пасты от влажности пологие, однако межчастичное взаимодействие сильнее во втором случае. Более резкое увеличение прочности связей в почве чистого пара свидетельствует об ухудшении физического состояния почв, вероятно за счет уменьшения содержания органического вещества (в с-х пашне содержание С% - 3,4%, в чистом пару – 2,99%)

Полученные экспериментальные данные в программе STATISTICA аппроксимированы степенным уравнением вида $y = \left(\frac{x}{b_2} \right)^{-b_1}$, где в качестве функции использовать прочность, а аргумента – влажность почвы; Параметр b_2 ответственен за положение зависимости: чем он больше, тем выше расположена кривая, т.е. при одинаковой влажности сопротивление пенетрации выше. А это значит, чем больше b_2 , тем сильнее межчастичные взаимодействия, лучше выражены межчастичные связи и меньше возможностей двигаться частицам друг относительно друга. Параметр b_1 указывает на крутизну исследуемой зависимости: чем он больше по абсолютной величине, тем круче кривая $Pm-W$ возрастает при снижении влажности. Физически это указывает на то, что в почвах с повышенным параметром b_1 при уменьшении влажности быстрее растут межчастичные взаимодействия, частицы при снижении W быстрее приходят в соприкосновение друг с другом, сильнее выражены дилатантные свойства и внутреннее трение. Параметры b_1 и b_2 исследованных почв представлены в таблице 7.

Определение зависимости пластической прочности почвенных паст от влажности показало четкое распределение исследованных образцов на две группы: 1) группа образцов с повышенным содержанием органического вещества (дубрава, степь, лесополоса); 2) образцы с пониженным содержанием органического вещества (пар, пашня).

Статистический анализ (приложение 2) показал, что параметры b_1 и b_2 для разных вариантов почв достоверно различны (табл. 8, $t_{\text{расч.}} > t_{\text{табл.}}$).

Таблица 7.

Параметры аппроксимации кривых зависимости P_m от W .

Угодье	b_1	b_2
Степь	7,6	45,4
Дубрава	23,6	51,0
Лесополоса	7,5	39,1
Пашня	3,9	20,7
Пар	15,5	32,0

Таблица 8.

Значения t-критерия сравниваемых параметров b_1 и b_2

		Степь		Дубрава		Лесополоса		Пашня	
		b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2
Дубрава	b_1	4,4							
	b_2		3,28						
Лесополоса	b_1	3,2		3,3					
	b_2		3,5		8,4				
Пашня	b_1	3,3		3,5		3,8			
	b_2		12,4		18,7		10,2		
Пар	b_1	3,2		3,2		4		7,4	
	b_2		9,3		22		6,5		3,2

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. Содержание общего углерода,

физической глины, удельная поверхность, влажности максимального набухания, предела текучести. Величины набухания образцов показаны в табл. 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. 13 показаны значения модулей упругости при двух условиях испытаний в области линейной вязкоупругости.

Как видно из рис.13, 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 сдавливания 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.

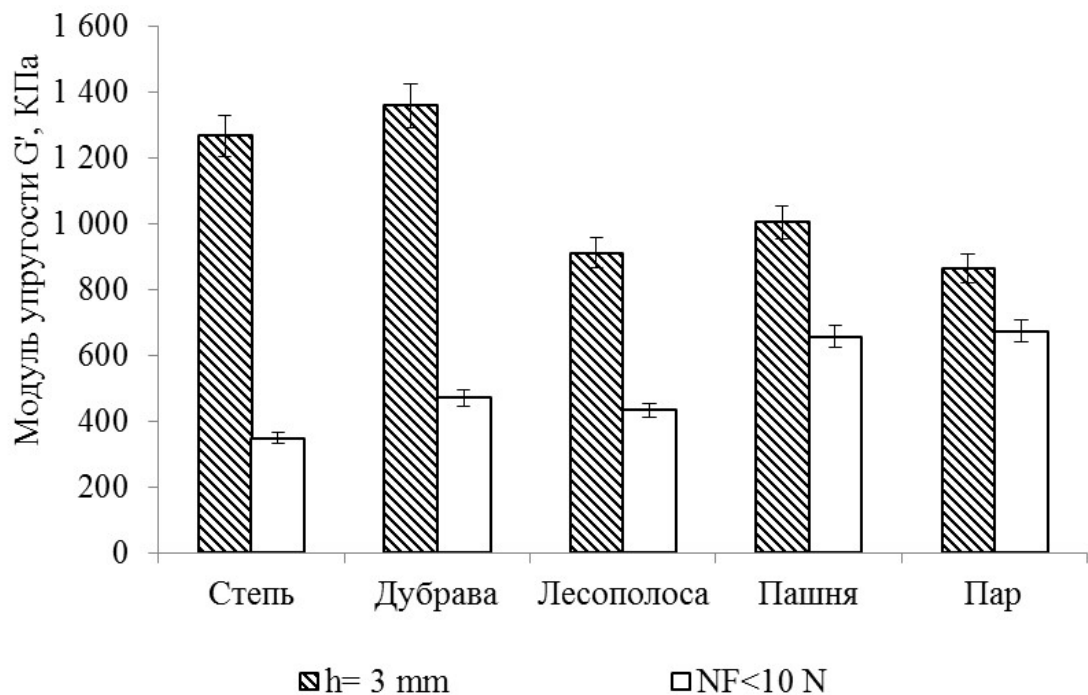


Рис. 13. Значения модулей упругости в диапазоне линейной вязкоупругости при разных условиях проведения испытаний для образцов гумусированных горизонтов

2.3.1. Реологические свойства исследуемых почв разной влажности

Исследование реологических свойств проводили для образцов влажности максимального набухания, влажности предела текучести, и влажности разрыва капилляров (табл. 9). Влажность максимального набухания достигалась тем, что растертые и просеянные образцы почв

помещались в трубочки с водопроницаемым дном и ставились на капиллярное водонасыщение на мокрую фильтровальную бумагу на сутки.

На следующие сутки образец подвергался реологическому испытанию. Влажность предела текучести устанавливалась традиционным способом с контролем образца балансирным конусом Васильева (Вадюнина, Корчагина, 1973). Влажность разрыва капилляров определяли предварительно по перегибу экспериментальной кривой сушки, фиксировали время высушивания образца при постоянной температуре до начала снижения скорости сушки или повышения температуры. Почвенный образец высушивали в течение предварительно определенного времени при заданной температуре, после чего подвергали реологическому испытанию.

Таблица 9.

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 были определены следующие параметры: модуль упругости и диапазон линейной вязкоупругости, точку пересечения модулей $G' = G''$ и величину интегральной зоны Z (рассчитывали с помощью программного обеспечения реометра). Диапазон линейной вязкоупругости – это область упругого поведения, область параллельного хода кривых модулей упругости G' и вязкости G'' . Чем он выше и больше, тем лучше межчастичные взаимодействия. Точка пересечения модулей

$G'=G''$ указывает величину деформаций, при которой деформационное поведение переходит от упруговязкого к вязкому. Величина интегральной зоны Z указывает на суммарную величину областей упругого и упруговязкого поведения, и чем эта величина больше, тем прочнее межчастичные связи и устойчивее структура (Markgraf и др., 2006, Хайдапова и др., 2016). Исследования проводили в трехкратной повторности, для обсуждения представлены средние величины.

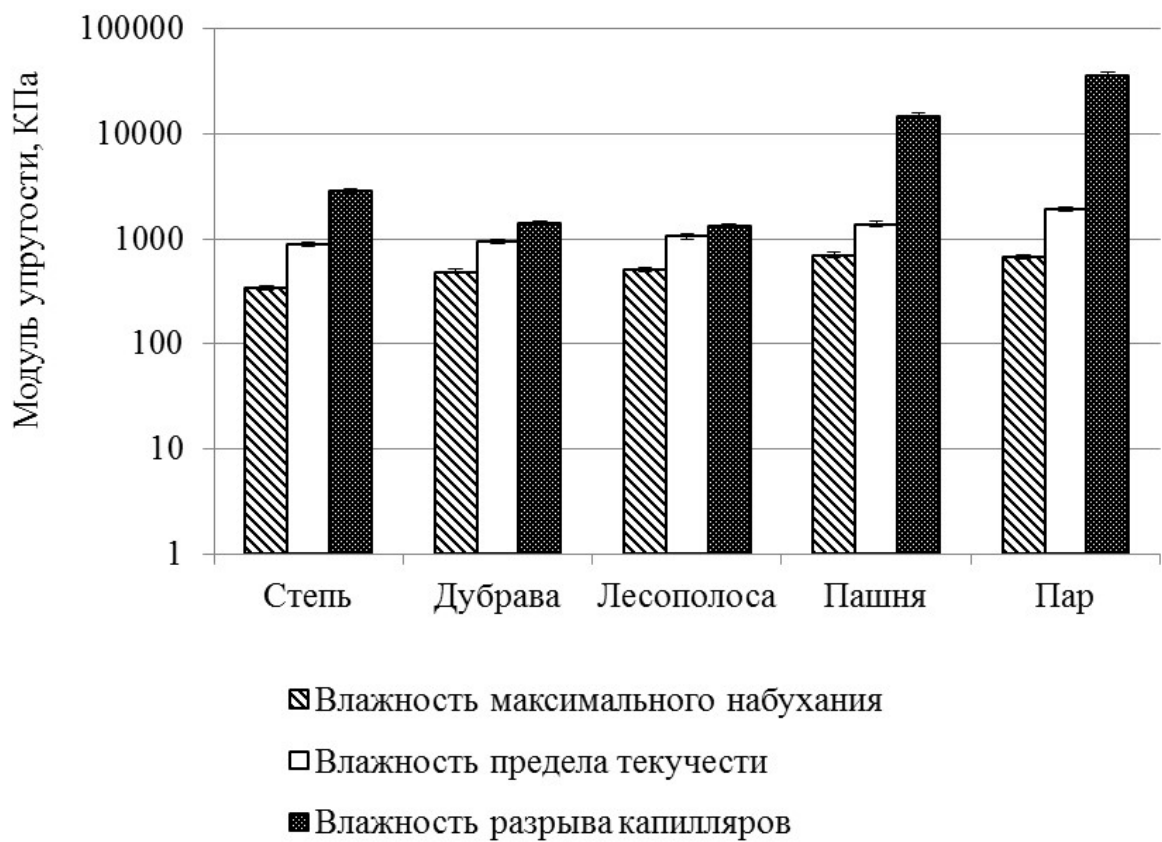


Рис. 14. Значения модулей упругости исследуемых образцов при разных влажностях

Прочность межчастичных связей или модуль упругости (рис. 14) 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. 9) 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 меньшим 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.

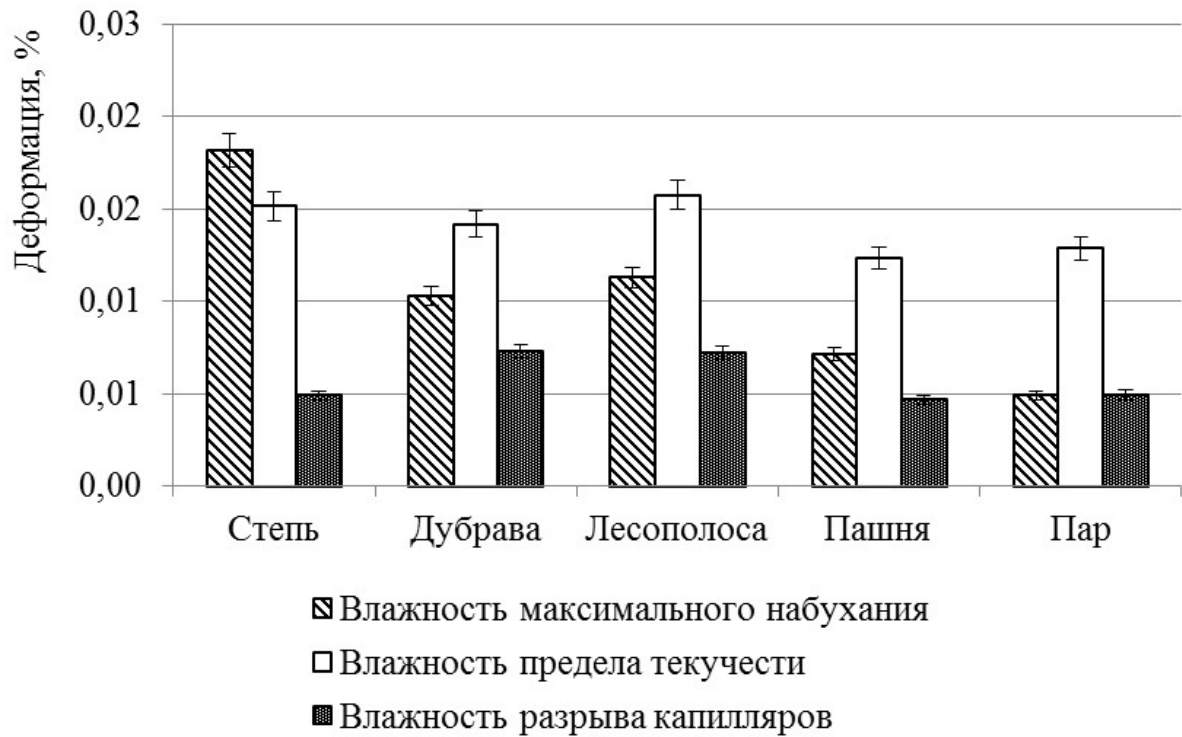


Рис.15. Диапазон линейной вязкоупругости при разных влажностях

Диапазон линейной вязкоупругости или область вязкоупругого поведения при влажности максимального набухания наибольший в степи и минимальный в образце пара (рис. 15). 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.

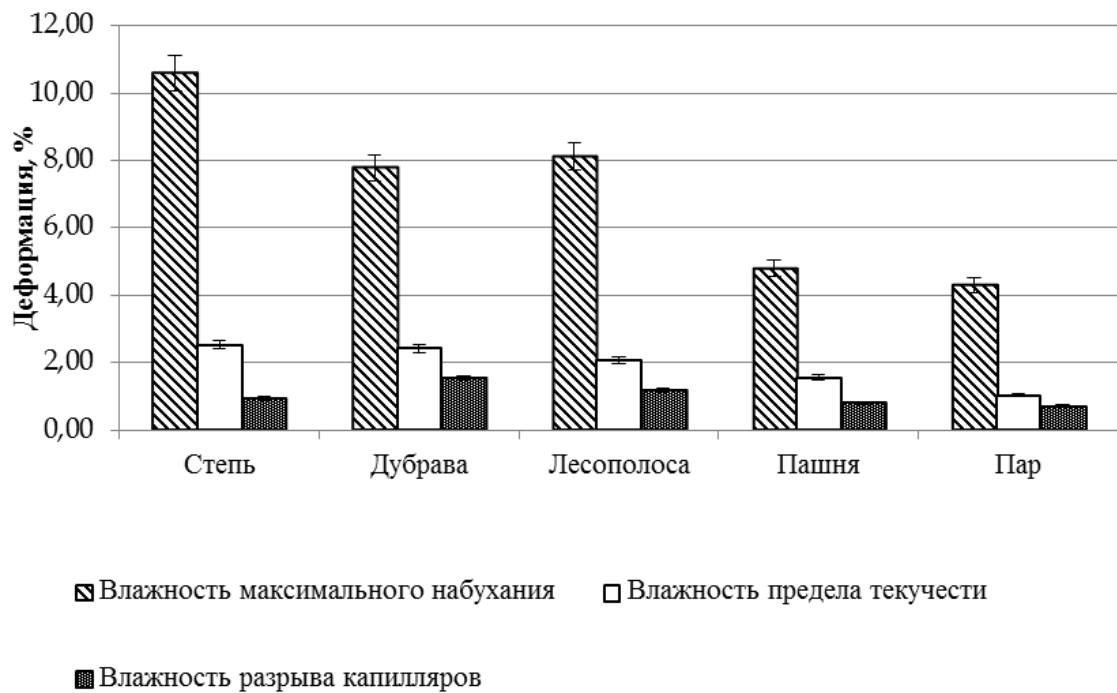


Рис.16. Пересечение модулей при разных влажностях для образцов гумусированных горизонтов

В точке пересечения модулей упругости и вязкости (рис. 16) величина деформации $\gamma(\%)$, 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.

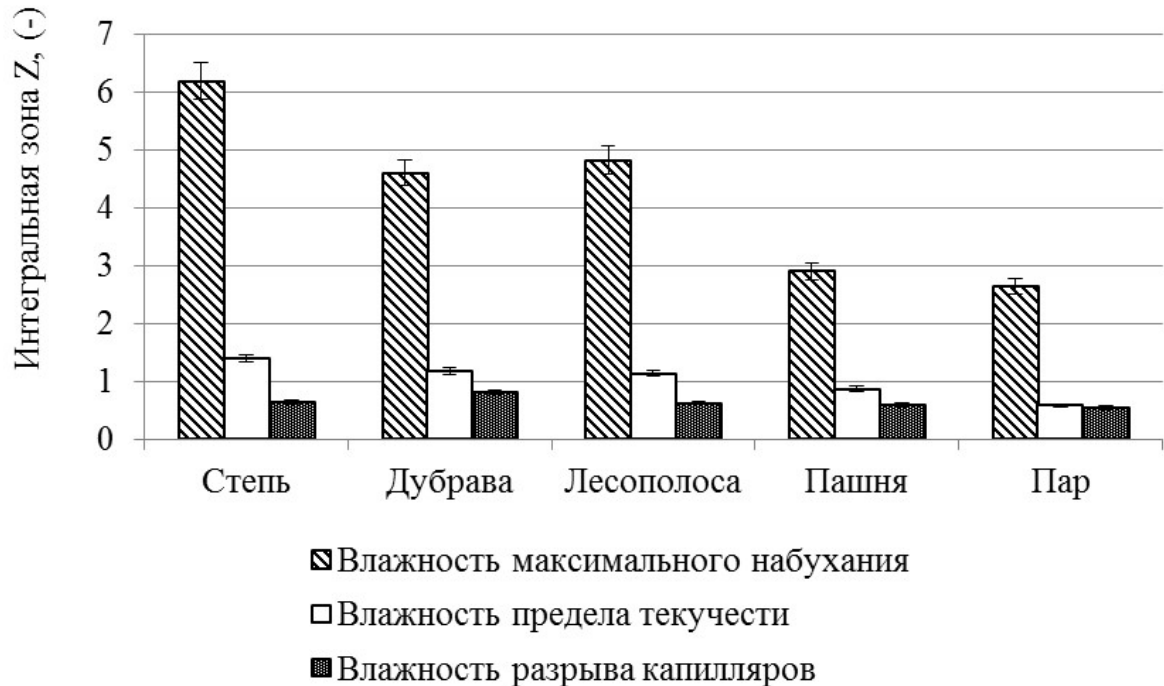


Рис. 17. Значения интегральной зоны Z

Как видно из рис. 17 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 . Реологические испытания проводились при разных влажностях: максимального набухания, предела текучести и влажности разрыва капилляров (таблица 10).

Таблица 10

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

Влажности образцов иллювиальных горизонтов при каждом уровне влажности достаточно равномерны в отличие от гумусированных. Сравнение модулей упругости иллювиальных и гумусированных образцов черноземов (рис. 18-20) 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).

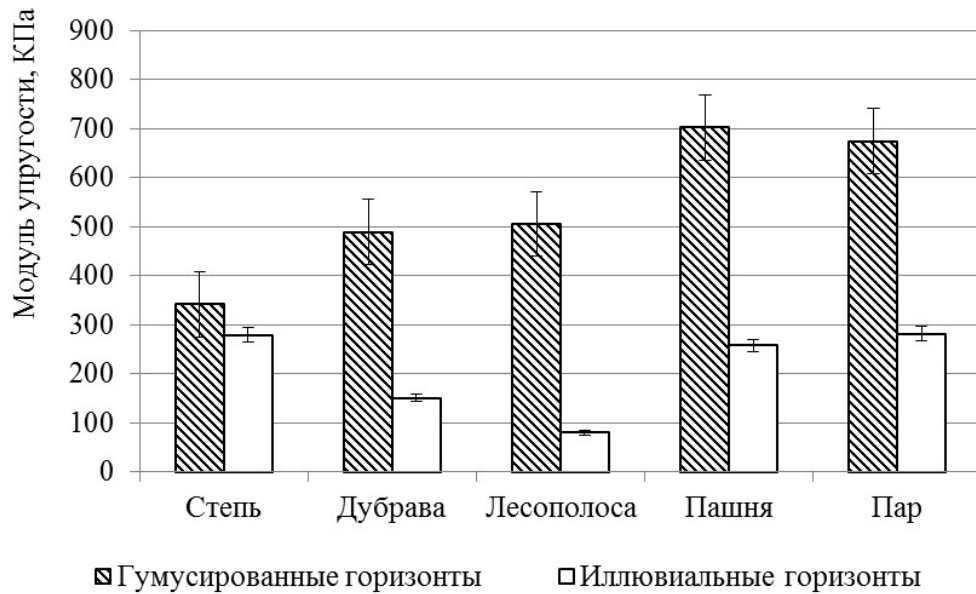


Рис.18. Модуль упругости при влажности максимального набухания

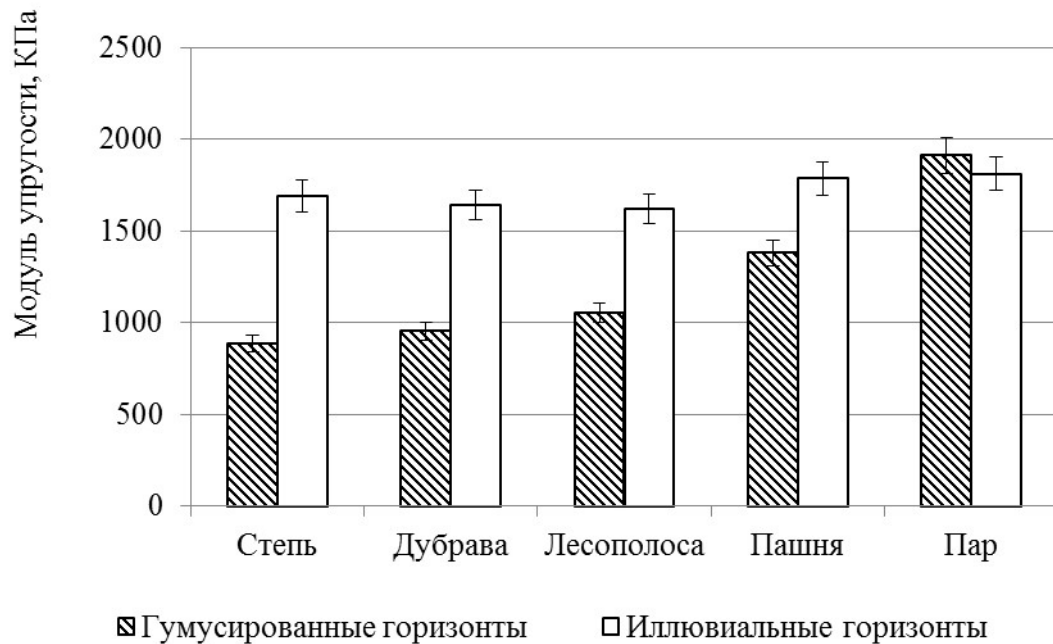


Рис.19. Модуль упругости при влажности предела текучести

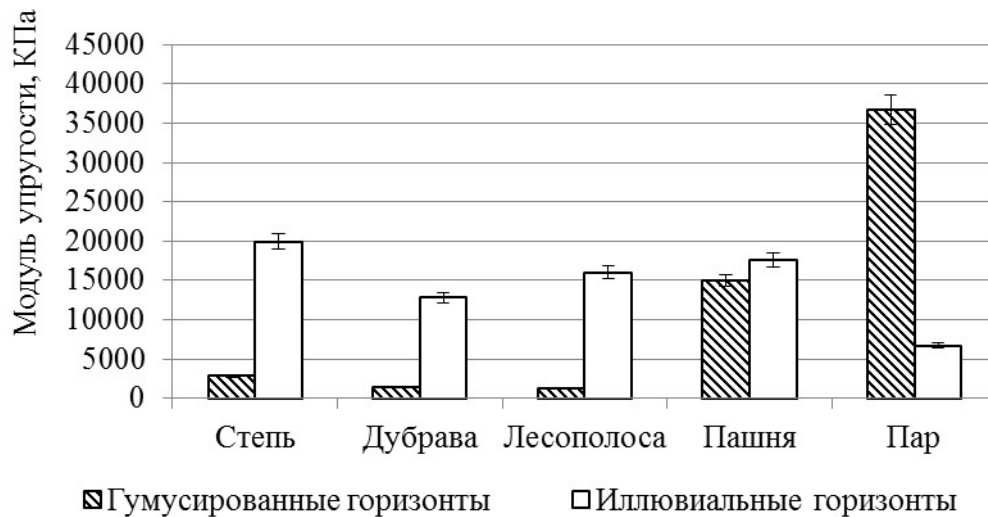


Рис.20. Модуль упругости при влажности разрыва капилляров

Пластичное поведение исследуемых почв оценивается величиной интеграла Z . Это значение наибольшее при влажности максимального набухания (рис. 21). 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. Такие различия вызваны большим количеством органического вещества, которое сильно набухает и препятствует разрушению связей почвенной структуры.

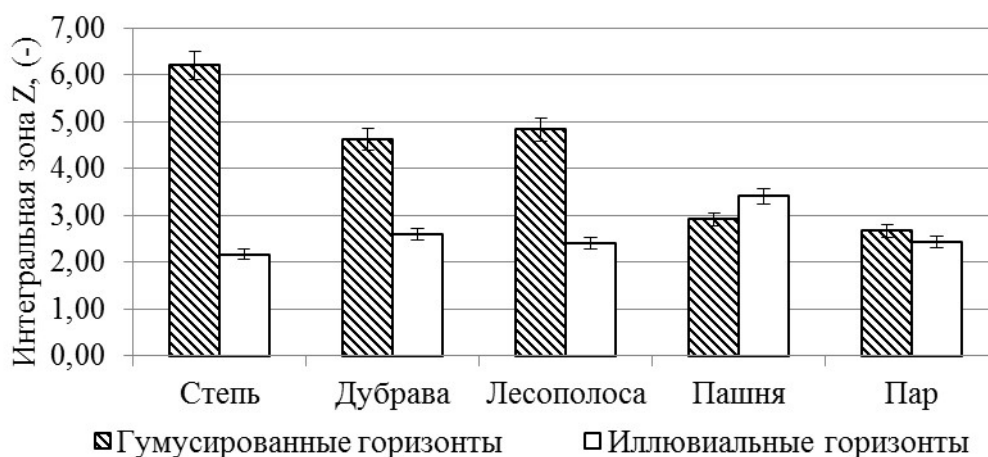


Рис.21. Величины интеграла Z гумусированных и иллювиальных горизонтов при влажности максимального набухания

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. 22). Исключение составляет эта величина для обоих горизонтов варианта пара, однако разница между ними незначительная.

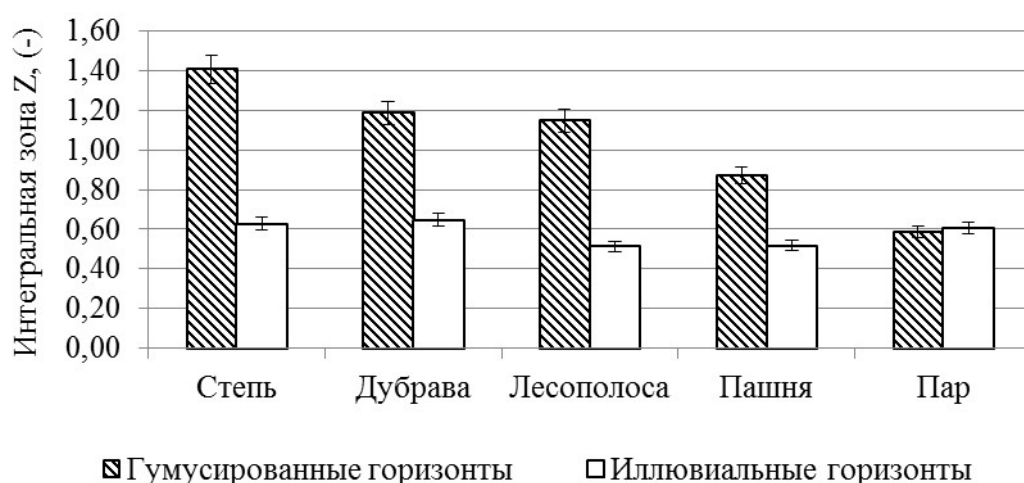


Рис.22. Величины интеграла Z гумусированных и иллювиальных горизонтов при влажности предела текучести.

При влажности разрыва капилляров поведение гумусированных и иллювиальных горизонтов становится приблизительно одинаковым в образцах богатых органическим веществом, а в образцах пашни и пара область упругопластичного поведения иллювиальных горизонтов становится даже больше, чем гумусированных (рис. 23). То есть при меньшей влажности наличие органического вещества способствует более хрупкому поведению, способствуя образованию агрегатов более мелкого размера. В иллювиальных горизонтах большая величина упругопластичного поведения обусловлена большей прочностью связей или большим модулем

упругости, что возможно является причиной образования глыбистой структуры.

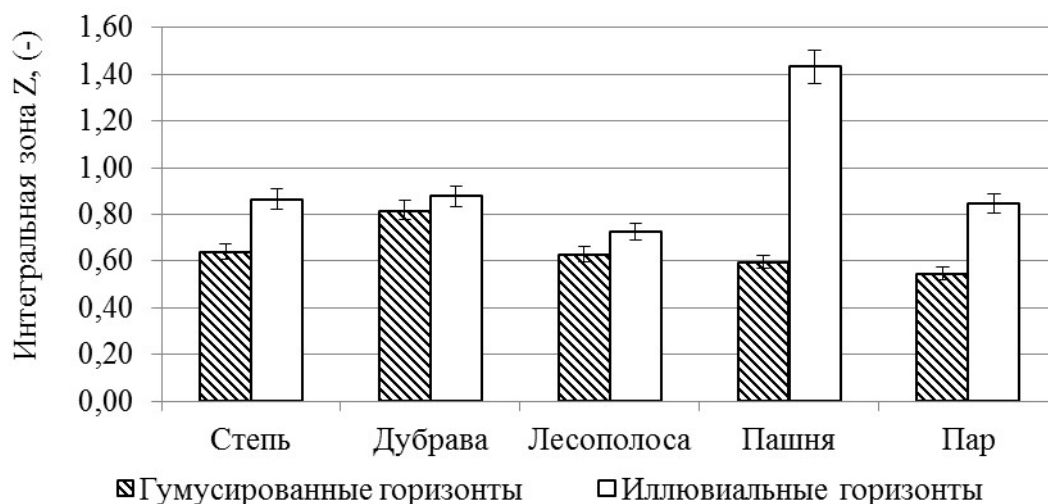


Рис.23. Величины интеграла $Z_{\text{гумусированных}}$ и $Z_{\text{иллювиальных}}$ горизонтов при влажности разрыва капилляров

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

Реологические испытания проводились при трех значениях влажности (табл. 10). 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

(Таблица 4, W_{k2}). По данному значению влажности графически по основной гидрофизической характеристике определили значение pF (рис.24).

На график основной гидрофизической характеристики (аппроксимированной уравнением Ван-Генухтена) нанесли значения влажностей почвенных паст, при которых проводили реологические испытания (рис.25.)

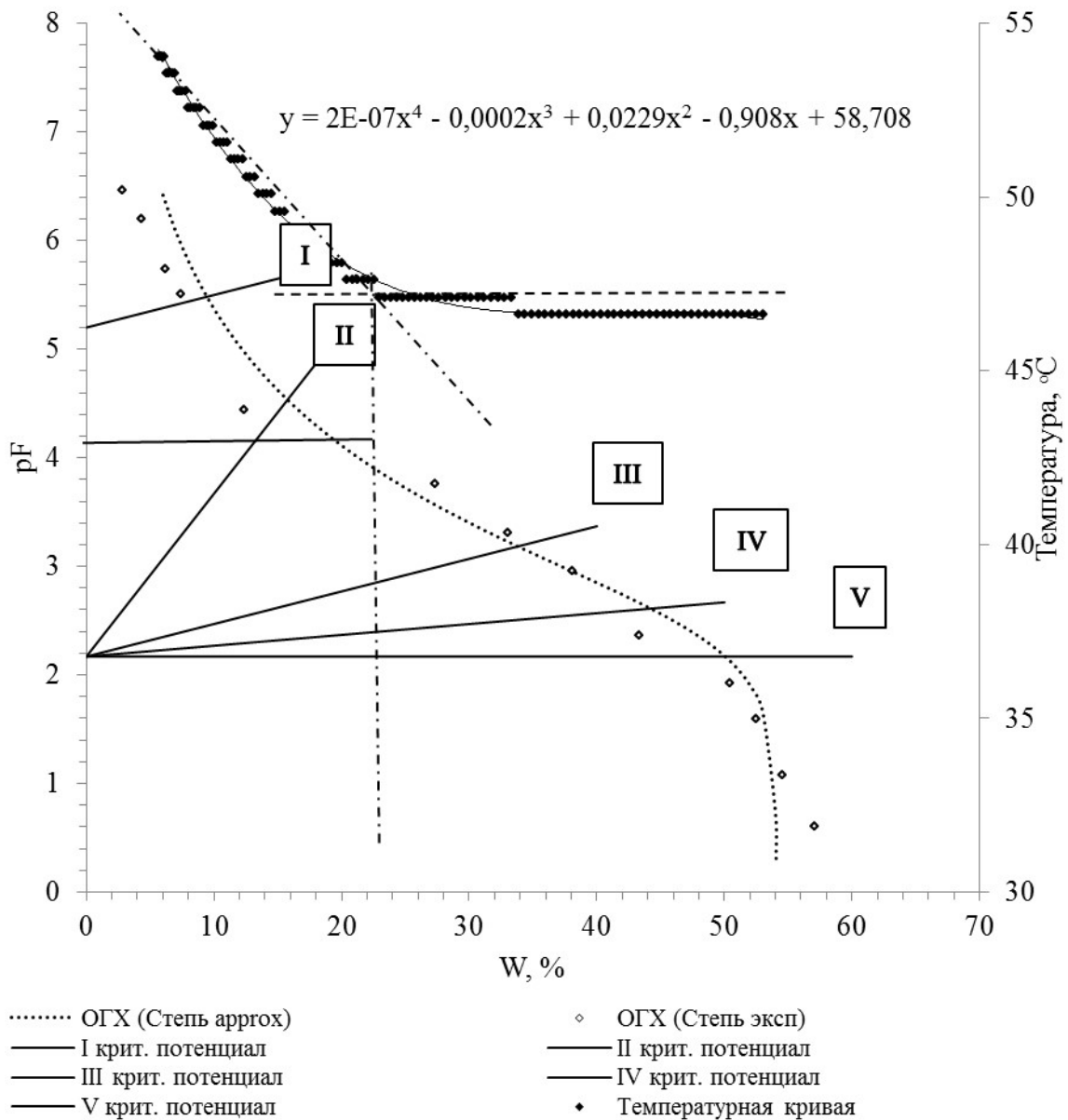


Рис.24. Основная гидрофизическая характеристика и температурная кривая для гумусированного образца некосимой степи.

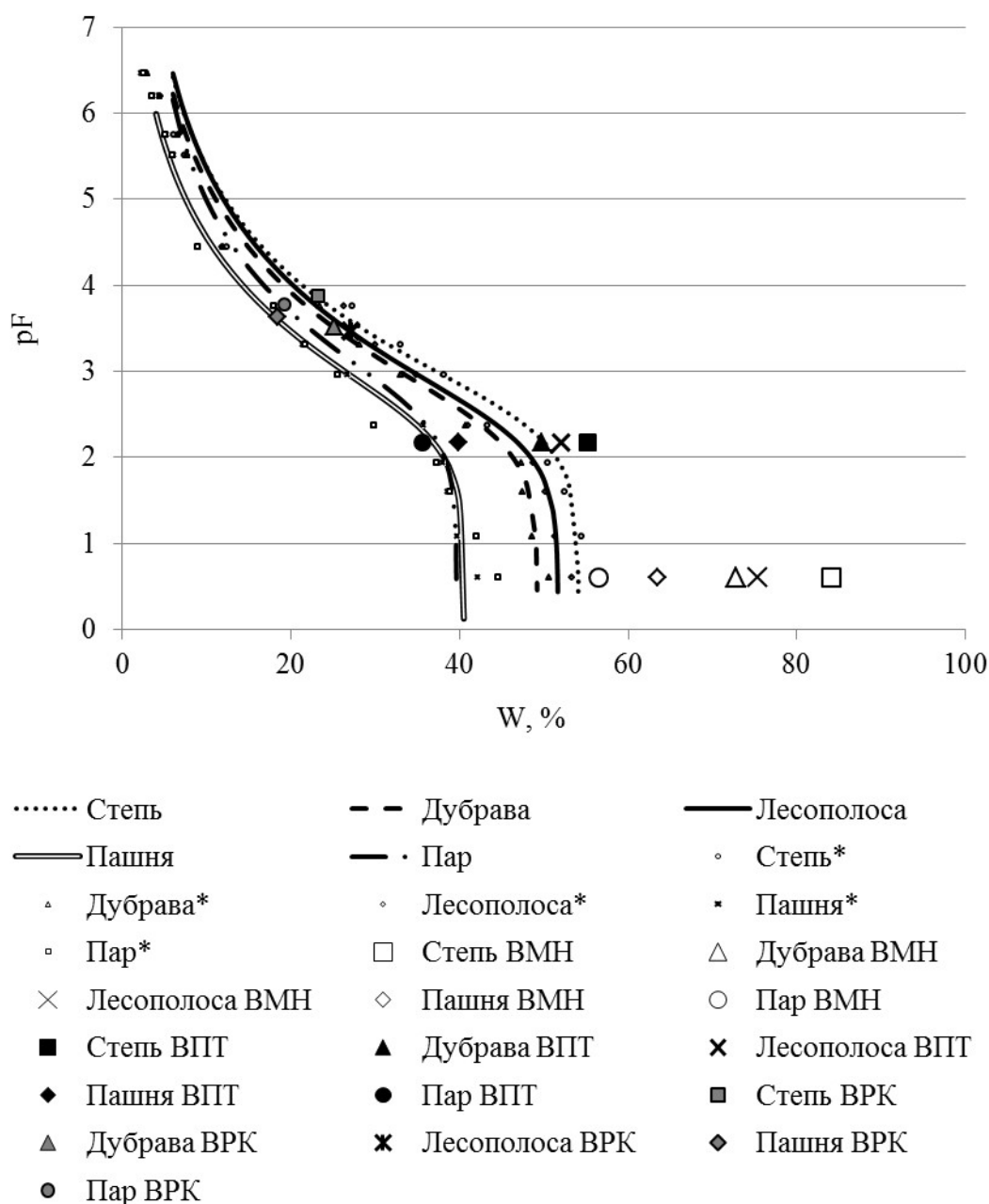


Рис.25. ОГХ и влажности проведения реологических испытаний для гумусированных горизонтов (*-экспериментальные значения основной гидрофизической характеристики, ВМН – влажность максимального набухания, ВПТ – влажность предела текучести, ВРК – влажность разрыва капилляров)

Таким же образом эти значения влажностей нанесли на основную гидрофизическую характеристику, аппроксимированную кусочно-линейным методом (рис. 26). 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 pF . Такое, например, происходит в случае определения pF для образца степи при влажности разрыва капилляров и образца длительного пара влажности предела текучести. Поэтому в дальнейшем для сопоставления значений реологических параметров и потенциалов почвенной влаги воспользуемся значениями pF , полученными при помощи основных гидрофизических характеристик, аппроксимированных по уравнению Ван-Генухтена.

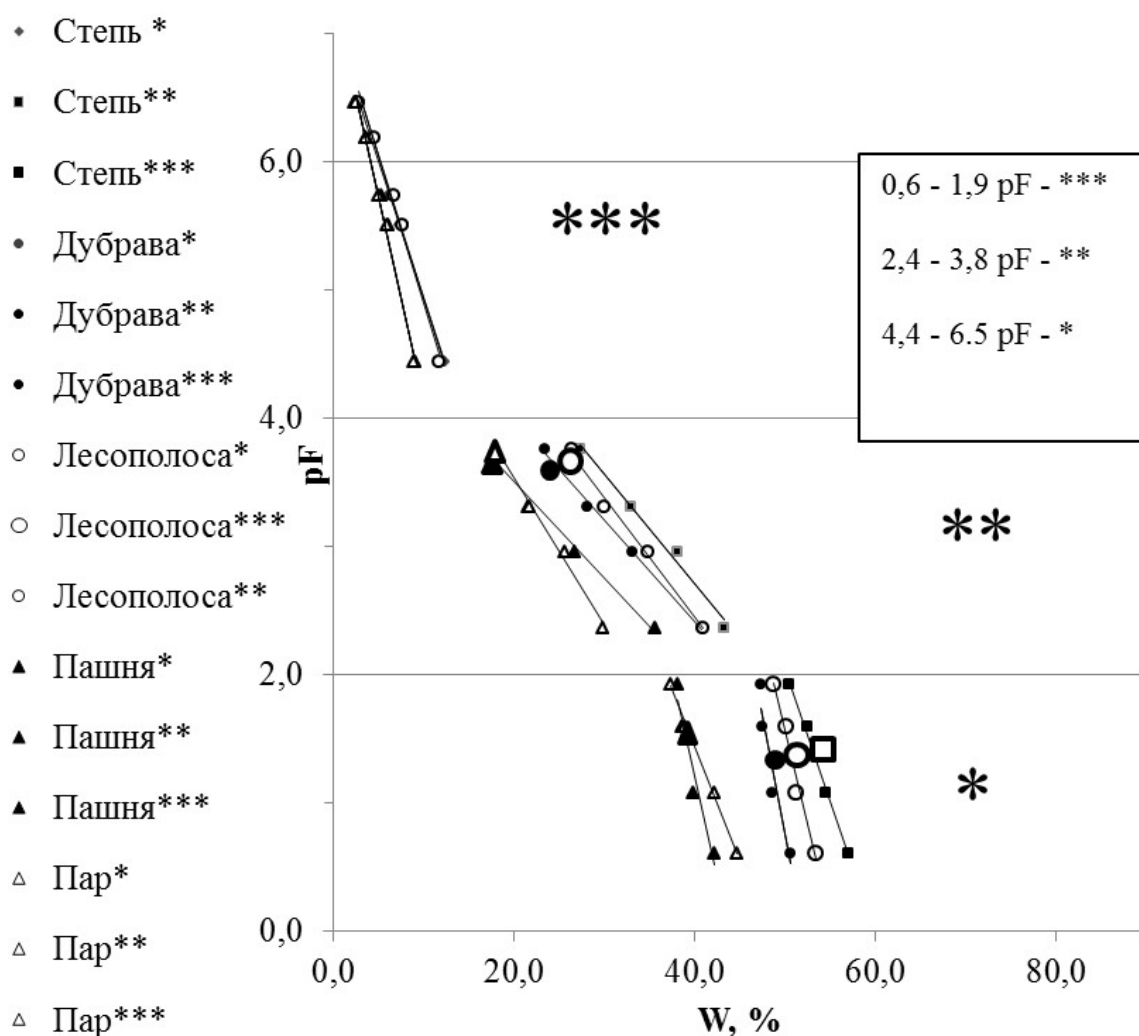


Рис.26. Основная гидрофизическая характеристика гумусированных слоев исследуемых почв (аппроксимация кусочно-линейным методом) и влажности проведения реологических испытаний.

Для всех образцов значение pF , 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 pF (рис.27). 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.

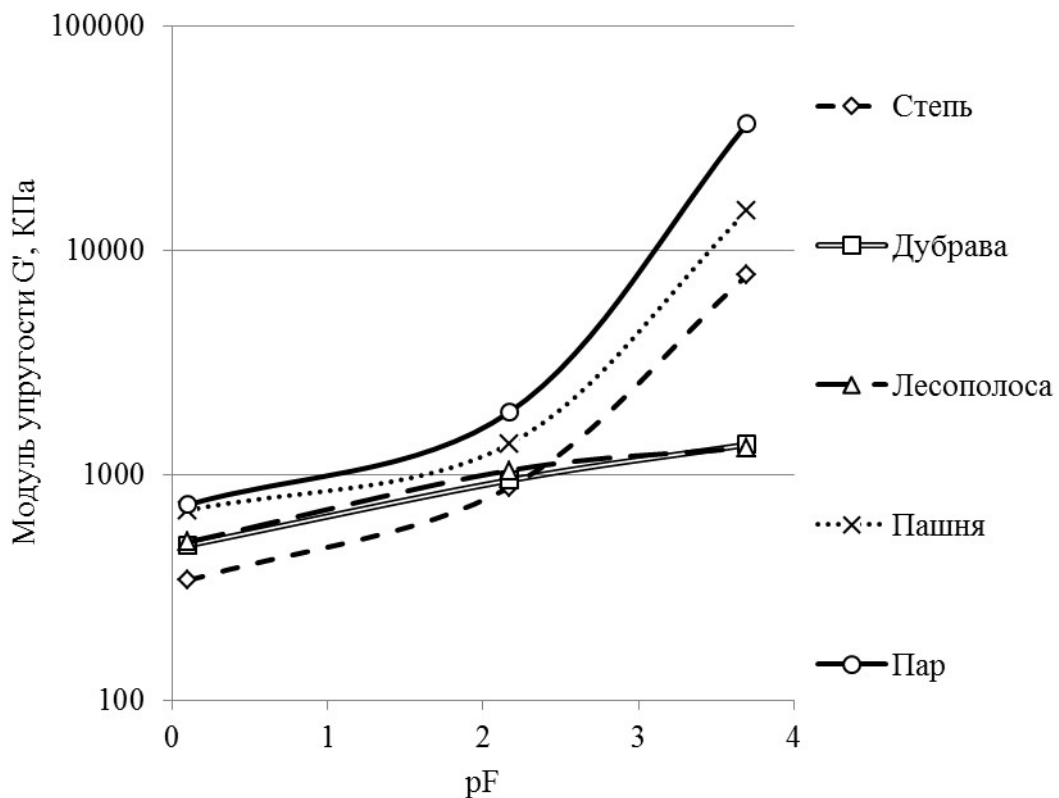


Рис.27. Зависимость модуля упругости гумусированных почв в диапазоне линейной вязкоупругости от потенциала почвенной влаги

При pF , равном 2,17 сила взаимодействия возрастает в 2-3 раза, потому что начинают усиливаться капиллярные силы. При $pF = 3,7$, межчастичное

взаимодействие увеличивается приблизительно в 3-50 раз, при данном потенциале капиллярные силы резко увеличиваются за счет увеличения кривизны менисков и свойств поверхности.

График зависимости интеграла Z от потенциала почвенной влаги (рис.28) показывает, как влияет потенциал почвенной влаги на изменение упругопластичного поведения почв. 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 агрегатообразования.

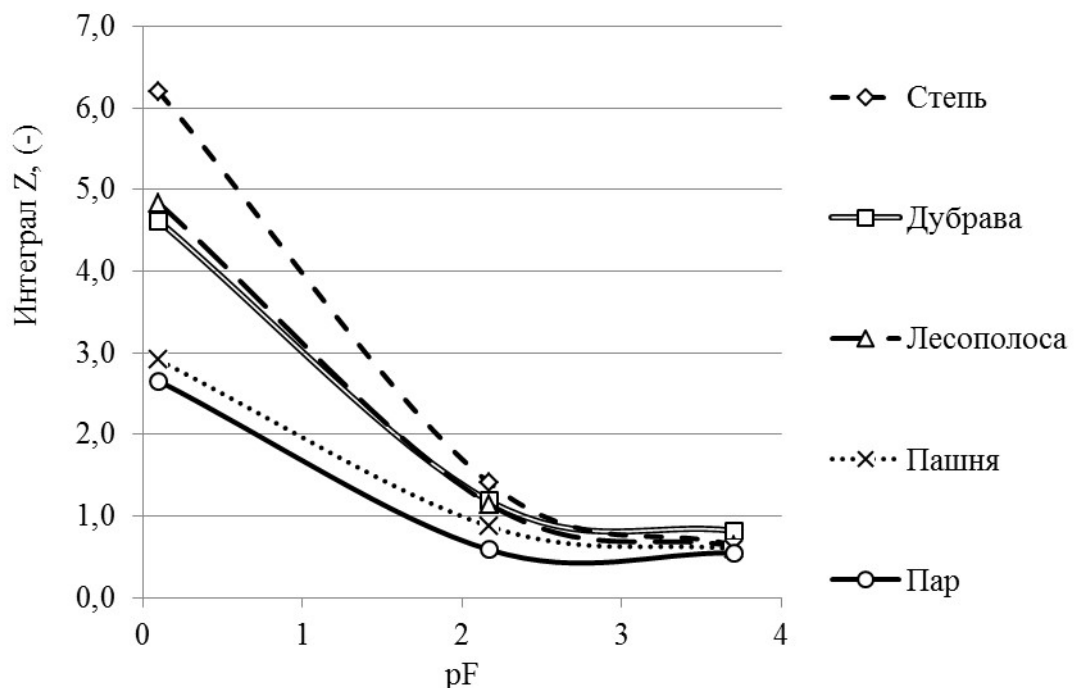


Рис.28. Зависимость величин интеграла Z гумусированных почв от потенциала почвенной влаги

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 противоэрозионную функцию, так и протекторную роль, которая препятствует установлению прочных межчастичных связей минеральной части почв при понижении влажности, чем обеспечивает благоприятное агрегатное строение, не позволяя минеральным частицам цементироваться в глыбы. Наличие органического вещества обуславливает более быстрый переход в гумусированных горизонтах от пластичного состояния к упруго-хрупкому при влажности разрыва капилляров. Возможно, именно реологическим поведением и обусловлено образование агрегатов при влажности разрыва капилляров. 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. Механическая обработка черноземов пахотных приводит к уменьшению содержания углерода, что приводит к понижению устойчивости почвенной структуры к нагрузкам, повышению прочности межчастичных связей при уменьшении влажности и соответственно уменьшению количества агрегатов оптимального размера (1-5мм) и увеличению глыбистой фракции. Выращивание лесополос на старопахотных землях способствует восстановлению органического запаса почв и повышению устойчивости почвенной структуры к нагрузкам.

Таким образом, определение реологических параметров при разном содержании влаги показало большую зависимость реологического поведения от содержания влаги. Чем меньше содержание влаги, тем прочнее

межчастичное взаимодействие. Диапазон пластичного поведения резко сокращается при переходе от влажности максимального набухания к влажности предела текучести и к влажности разрыва капилляров. Кривые сушки при постоянной температуре с синхронным определением температуры позволяют по переломам кривых определять границы содержания капиллярной влаги: 1) при переходе от свободной к капиллярной; 2) от капиллярной к пленочной влаге (влажность разрыва капилляров). Наибольшим содержанием капиллярной влаги отличаются образцы почв богатые органическим веществом. При r_F близком к нулю прочность межчастичных связей имеет минимальное значение (340-740 кПа) и почва находится в состоянии близком к текучему, при $r_F=2,17$ сила взаимодействия возрастает в 2-3 раза (885-1212 кПа) почва находится в пластичном состоянии, при $r_F \approx 3,7$ межчастичное взаимодействие увеличивается приблизительно в 3-50 раз (7790-36700 кПа) почва переходит в упруго-хрупкое состояние. Графики основной гидрофизической характеристики при влажности максимального набухания всех исследованных вариантов лежат значительно правее кривых основной гидрофизической характеристики при влажности предела текучести и $r_F=2,17$. Влажность разрыва капилляров соответствует $r_F \approx 3.7$. Значение влажности разрыва капилляров находится между II и III критическим потенциалом по Воронину на кривых основной гидрофизической характеристики.

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 агрегатообразования соответствует влажности разрыва капилляров.
2. Отработана методика определения реологических характеристик методом амплитудной развертки набухающих почв. Рекомендуется проводить измерения при контроле нормальной силы не более 10N.
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 установлению прочных межчастичных связей минеральной части почв, чем обеспечивает благоприятное агрегатное строение, не позволяя минеральным частицам цементироваться в глыбы. Образцы, богатые ОВ (целина, дубрава, лесополоса), обладают более пластичным поведением и большей устойчивостью к нагрузкам во всем диапазоне влажностей. Образцы с меньшим содержанием ОВ (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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрикова Л.П. Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях // Почвоведение, 1970, № 3, с.105-114
2. Абрикова Л.П. Тиксотропные свойства почв. Депон. науч. отчет №71074971 1977. – 141с.
3. Абрикова Л.П. Тиксотропные свойства тёмно-серых лесных почв // Почвоведение, 1972, № 8, с.74-82
4. Абрикова, Л.П. Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях / Л.П. Абрикова // Почвоведение, 1970. – № 3. – С. 104–114.
5. Аксенов А.В. Физико-механические свойства почв и энергетическое состояние почвенной влаги. Автореф. дисс. канд. биол. наук., 2003, с.24
6. Андрианов П.И. Теплота смачивания и удельная поверхность. М.: ВАСХНИЛ, 1937, с. 76
7. Андрианов, П.И. Связанная вода почв и грунтов // Труды института Мерзлотоведения им. В.А. Обручева М.: АН СССР, 1946, с.56
8. Антипов-Каратаев И.Н., Келлерман В.В., Хан Д.В. О почвенном агрегате и методах его исследования – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1948, 82с.
9. Афанасьева Е.А. К вопросу о передвижении карбонатов в мощных чернозёмах. // Тр. Центр.-Чернозёмн. запов. М. 1940, Вып. 1,с. 247-272
- 10.Афанасьева Е.А. Черноземы Среднерусской возвышенности. М.: Наука, 1966. с.200
- 11.Базыкина Г.С. Бойко О.С. Влияние аномальных погодных условий последних десятилетий на водный режим мощных

- черноземов заповедной степи (Курская область) // Почвоведение, 2008, № 7, с.833-844
- 12.Базыкина Г.С. Бойко О.С. Особенности режима влажности типичных черноземов косимой степи и пашни (Курская область) в условиях аномальной погоды последних десятилетий // Почвоведение, 2010, № 1, с.58-70
 - 13.Базыкина Г.С. Многолетняя динамика элементов водного баланса типичных черноземов заповедной степи (Курская обл.) // Почвоведение, 2010, № 12, с.1468-1478
 - 14.Базыкина Г.С., Овечкин С.В. Карбонатный профиль и режим влажности миграционно-мицелярных черноземов разных экосистем Курской области //Почвоведение, 2011, № 12, с.1475-1486
 - 15.Болотов, А. Г. Методика измерения реологических свойств почвы с помощью реометра // Дальневосточный аграрный вестник. – 2015. – № 3. – С. 13-17.
 - 16.Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1961. с.454
 - 17.Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования.– М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. - 187с.
 - 18.Вершинин П.В., Мельникова М. К., Мичурин Б. Н., Мошков Б. С., Поясов Н. П., Чудновский А.Ф. Основы агрофизики – М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1959, 903с.
 - 19.Вильямс В. Р. Прочность и связность структуры почвы. // Почвоведение, 1935, № 5/6. С. 746-754.
 - 20.Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во МГУ, 1986. 244с
 - 21.Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. - М.: Изд- во Моск. ун-та, 1984. - 204 е., ил.

- 22.Воронин А.Д. Структурно-энергетическая концепция гидрофизических свойств и ее практическое применение. //Почвоведение, 1980, №12, С. 35 – 46
- 23.Воронин А.Д. Энергетическая концепция физического состояния почв. Почвоведение, 1990, № 5. С. 7-19.
- 24.Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов М.: Высшая школа, 1978. - 447 с.
- 25.Гамаюнов Н.И. «Исследование процесса структурообразования при сушке капиллярно-пористых материалов» //Почвоведение, 1985, №5, 142-152
- 26.Гедройц К. К. Коллоидальная химия в вопросах почвоведения. В 2-х чч. Ч. 1. Коллоидальные вещества в почвенном растворе. Образование соды в почве. Солонцы и солончаки. — СПб.: Бюро по земледелию и почвоведению Уч. комиссии Гл. упр-я землеустройства и земледелия, 1912. — 58 с.
- 27.Горбунов Н.И. Абрикова Л.П. Реологические свойства и минералогический состав слитых почв //Почвоведение, 1974, № 8, с.74-85
- 28.Горбунов Н.И. Минералогия и коллоидная химия почв. 1974, М, Изд-во «Наука», с.313
- 29.Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1957, 207 с.
- 30.Дармаева Н.Н. Хайдапова Д.Д. Пластическая прочность и экологическая устойчивость мерзлотных почв в зависимости от их положения в склоновом рельефе на юге Витимского плоскогорья Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова, 2012, №2, с.28-32

31. Длительные полевые опыты на черноземах Курской области России. Путеводитель к международному научному симпозиуму. 14-17 сентября 2010, Курск, 34с
32. Жукова Ю.А., Хайдапова Д.Д., Ковда И.В., Моргун Е.Г. Реологические характеристики гильгайных слитоземных комплексов в разных климатических условиях. // вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение, 2015, Изд-во Моск. Ун-та (М.), № 3, с. 25-30
33. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: Рузаки, 2001. 296 с.
34. Капинос В.А., Егоров Ю.В., М.Д. Омар. Исследование кинетики сушки почв // Почвоведение, 1991, №1, с.39-47
35. Качинский Н.А. Структура почв Москва: МГУ, 1963. — 101 с
36. Качинский Н.А. Физика почв. — М.: Высшая школа. 1965. Ч. 1. с.322
37. Колясев Ф.Е. Испарение воды почвой // Почвоведение, 1939, N5, с.33-53
38. Колясев Ф.Е. О факторах движения воды в почве // Почвоведение, 1944, №2-3, с.80-86
39. Кузнецова И. В. Изменения физического состояния черноземов типичных и выщелоченных Курской области за 40 лет / // Почвоведение. - 2013. - № 4. - С. 434-441
40. Лукьянов А.Б. Физическая и коллоидная химия. — М.; Химия, 1980, 224 с.
41. Лыков А.В. Теория сушки. — М.: Энергия, 1968. — 470с.
42. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения/Пер. с англ. — СПб.: Профессия, 2007.-560 с.
43. Манучаров А.С. К использованию реологических исследований в почвоведении // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1983. № 3. С. 56—40.

- 44.Милановский Е.Ю., Шеин Е.В. Функциональная роль амфифильных компонентов гумусовых веществ в процессах гумусо-структурообразования и генезисе почв. // Почвоведение. 2002. №10, С.1201-1213.
- 45.Милановский, Е. Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно- гидрофильные соединения [Текст] / Е. Ю. Милановский. - М.: ГЭОС, 2009. - 186 с.
- 46.Никитин В.И. Компьютерные методы моделирования физических процессов. Учебное пособие для студентов заочной формы обучения. СамГТУ, Самара, 2016, С. 36.
- 47.Николаева И.В., Початкова Т.Н., Манучаров А.С. Влияние азотных удобрений и известкования на реологические свойства дерново-подзолистых почв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. - №2 (40). - С. 31-35.
- 48.Николаева И.В., Початкова Т.Н., Манучаров А.С. Влияние длительного применения удобрений на реологические свойства чернозема типичного // Вестник ОГУ. 2007. - №12. - С. 91-95.
- 49.Орлов Д.С. Химия почв. М: Изд-во МГУ, 1985. 376
- 50.Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур // Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966, с.3-16.
- 51.Сакункончак Т., Милановский Е. Ю., Хайдапова Д. Д. Изменения некоторых физических свойств дерново-подзолистых почв в длительном агрономическом опыте // Вестник ОГУ. 2009. №6 С. 605-608.
- 52.Сидорова М.А., Умарова А.Б., Смагин А.В., Хайдапова Д. Д. Спецпрактикум по физике почв. – М: Изд-во МГУ, 2012 г, с.36
- 53.Смагин А.В. IX.4. Метод центрифугирования (модификация А.В. Смагина) /Глава из монографии «Теории и методы физики почв»

- / Под ред. Е. В. Шеина и Л. О. Карпачевского. – М. : «Гриф и К», 2007. С. 273-277
54. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 335 с.
 55. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Хайдапова Д.Д. Изучение механизма влияния органического вещества на структурно-механические свойства почв. // Доклады Академии наук, изд-во Наука (М.), 2014 том 456, № 1, с. 121-125
 56. Фукс Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. Под ред. М. М. Кусакова - М.: Гостоптехиздат, 1951. - 272 с.
 57. Хайдапова Д.Д. Методы исследования физико-механических свойств почв /Глава из монографии «Теории и методы физики почв» / Под ред. Е. В. Шеина и Л. О. Карпачевского. – М. : «Гриф и К», 2007. С. 490-589
 58. Хайдапова Д.Д., Аксенов А.В. - Взаимосвязь пластической прочности и липкости почв с основной гидрофизической характеристикой 2001 почвоведение
 59. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В. Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно-нарушенных почвах // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2014. № 6. С. 53–57.
 60. Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А. Прочность межчастичных связей в почвенных пастах и агрегатах //Почвоведение, 2007, №11, с.1330-1335
 61. Хайдапова Д.Д., Холопов Ю.В., Ключева В.В., Честнова В.В. Реологический подход в оценке межчастичных взаимодействий в почвах // Отражение био-, гео- антропосферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове / под ред. С.Н. Кирпотина, Л.Г.

- Колесниченко., Издательский дом Томского государственного университета, Томск, 2016 с. 231-234
- 62.Хайдапова Д.Д., Холопов Ю.И., Забоева И.В., Лаптева е.м. Реологические особенности коагуляционной структуры северотаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв европейского северо-востока // Вестник Московского университета. 2014 Серия 17: Почвоведение, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), № 1, с. 20-25
- 63.Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Ключева В.В., Реологический подход к оценке деградации структуры почв. Роль почв в биосфере и жизни человека, МАКС Пресс Москва, 2015, с. 124-126
- 64.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.
- 65.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, Москва, 2015, с. 55-58
- 66.Честнова В.В., Хайдапова Д.Д. 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. Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева. Москва, 2015, с. 264-266
- 67.Честнова В.В., Хайдапова Д.Д. Физические и реологические свойства чернозема типичного., ж.//Сахарная свекла. 2015, № 9, с. 10-13

- 68.Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2005, с.430
- 69.Шеин Е.В., Болотов А.Г., Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н. Реологические свойства черноземов Алтайского Приобья //Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2014. № 8, с. 32–38.
- 70.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
- 71.Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Под ред. В.Г. Куличихина. М.: Колос, 2003. 311 с.
- 72.Baumgarten, W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales. 2013, habilitation thesis, Kiel University, P. 263
- 73.Chen K.Y., Heenan D.P. Lime – induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. // Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, Vol. 63, P. 1841–1844.
- 74.Edwards, A.P., and J.M. Bremner, 1967. Microaggregates in soils // J. Soil Sci. 18:64-73.
- 75.Emerson, W.W. Stability of soil crumbs. 1959. Nature 183:538.
- 76.Ghezzehei T.A. and Or D. Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses. //Soil Science Society of America Journal. 2001, V. 65 (3), 624-637
- 77.Greacen, E. and A. Huon. Microscopic changes in soil aggregates during permeability tests. // Austr. J. Agric.Res. 1953 V.4, P.184-192.

- 78.Horn, R., and A.J.M. Smucker, Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils // Soil Till. Res. 2005, V.82, P. 5-14.
- 79.Kaiser K., Guggenberger G., Mineral surfaces and soil organic matter // Eur. J. Soil Sci. 2003, V.54, P. 219-236.
- 80.Kaiser, K., Eusterhues, K., Rumpel, C., Guggenberger, G., and I. Kögel-Knabner. Stabilisation of organic matter by soil minerals - investigations of density and particle size fractions from two acid forest soils. // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2002., V. 165, P.451-459.
- 81.Khaydapova D., Milanovskiy E., Shein E.. Rheological properties of different minerals and clay soils // Eurasian Journal of Soil Science, 2015.
- 82.Lal, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. //Soil Tillage Res. 1993, V. 27, P. 1–8.
- 83.Lehmann, J., Kinyangi, J., and D. Solomon. Organic matter stabilization in soil microaggregates: implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms. Biogeochem. 2007, V.85, P. 45-57.
- 84.Markgraf W., Bellmann C., Caspari A., Horn R. Quantifying microstructural stability of South-Brazilian soils by the application of rheological techniques and zeta potential measurements //A Christian-Albrechts-University zu Kiel, Institute for Plant Nutrition and Soil Science, Hermann-Rodewald-Str. 2, D-24118 Kiel, Germany, 2010. P. 1778-1782
- 85.Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics–Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil Tillage Res. 2006. V. 91. P. 1–14.
- 86.Markgraf W., Moreno F., Horn R. Quantification of microstructural changes in salorthidic fluvaquents using rheological and particle

- charge techniques // Vadose Zone J., 2011., V. 11(1). [dx.doi.org/vzj/11/1/vzj](https://doi.org/10.2136/vzj1111.vzj1111)
87. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Horn R. Influence of mineralogical compounds and organic matter on rheological properties: Classifying stiffness degradation in soils. Proceedings of the 21st ACMS Conference, Brisbane, Australia, 2010, P. 7-8, (peer-reviewed)
 88. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R. Influence of organic matter on rheological properties of soil // Appl. Clay Sci. 2012, V. 64, P. 25–33.
 89. Mezger T.G. The Rheology handbook. Hanover, Germany, 2011, 436 p.
 90. Micheli E, Tombacz E., T Szegi, A. Gal The Relationship of Rheological Parameters and Erodibility of Soils. 12th ISCO Conference Beijing. 2002, P.111-115.
 91. Oades, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management.// J. Plant Soil., 1984, V. 76, P. 319-337.
 92. Pertile P, Reichert JM, Gubiani PI, Holthusen D, Costa A. Rheological Parameters as Affected by Water Tension in Subtropical Soils. Rev Bras Cienc Solo. 2016; 40:e0150286.
 93. Piccolo A., Mbagwu J.S.C. Role of Hydrophobic Components of Soil Organic Matter in Soil Aggregate Stability. // Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, V. 63, P. 1801–1810.
 94. Quirk, J.P. The measurement of stability of soil microaggregates in water.// Austr. J. Agric. Res. 1950. V. 1, P. 276-284.
 95. Sideri, D.I. On the formation of structure in soil: II. Synthesis of aggregates; on the bonds uniting clay with sand and clay with humus.// Soil Sci., 1936, V. 42, P. 461-479.

96. Six J, Bossuyt H, De Gryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. // Soil Till. Res., 2004, V. 79: P. 7-31.
97. 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, P. 2-91
98. Van Genuchten, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. V. 44. P. 892-898.
99. Yukselen, Y. and Kaya, A., Comparison of Methods for Determining Specific Surface Area of Soils. // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, V. 132 (7), P. 931-936.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблицы данных, полученных и рассчитанных в результате высушивания
гумусированных образцов вариантов: а) Степь б) Дубрава в) Лесополоса
г) Пашня д) Пар

а)

Время, мин	Масса m,г	Влажность W, %	скорость сушки, %/мин	Время сушки, t	температура t, °C
0:00:00	8,039	68,88655	0,588235	13:12:01	20,202
0:01:00	8,011	68,29832	0,735294	13:13:01	27,204
0:02:00	7,976	67,56303	0,840336	13:14:01	37,673
0:03:00	7,936	66,72269	0,861345	13:15:01	43,637
0:04:00	7,895	65,86134	0,861345	13:16:01	47,606
0:05:00	7,854	65	0,840336	13:17:01	49,588
0:06:00	7,814	64,15966	0,819328	13:18:01	50,578
0:07:00	7,775	63,34034	0,777311	13:19:01	50,578
0:08:00	7,738	62,56303	0,756303	13:20:01	50,578
0:09:00	7,702	61,80672	0,735294	13:21:01	50,578
0:10:00	7,667	61,07143	0,693277	13:22:01	50,083
0:11:00	7,634	60,37815	0,672269	13:23:01	49,588
0:12:00	7,602	59,70588	0,672269	13:24:01	49,092
0:13:00	7,57	59,03361	0,630252	13:25:01	48,597
0:14:00	7,54	58,40336	0,630252	13:26:01	48,597
0:15:00	7,51	57,77311	0,609244	13:27:01	48,101
0:16:00	7,481	57,16387	0,609244	13:28:01	48,101
0:17:00	7,452	56,55462	0,609244	13:29:01	47,606
0:18:00	7,423	55,94538	0,588235	13:30:01	47,606
0:19:00	7,395	55,35714	0,567227	13:31:01	47,11
0:20:00	7,368	54,78992	0,588235	13:32:01	47,11
0:21:00	7,34	54,20168	0,567227	13:33:01	47,11
0:22:00	7,313	53,63445	0,588235	13:34:01	47,11
0:23:00	7,285	53,04622	0,567227	13:35:01	46,614
0:24:00	7,258	52,47899	0,567227	13:36:01	46,614
0:25:00	7,231	51,91176	0,567227	13:37:01	46,614
0:26:00	7,204	51,34454	0,546218	13:38:01	46,614
0:27:00	7,178	50,79832	0,567227	13:39:01	46,614
0:28:00	7,151	50,23109	0,546218	13:40:01	46,614
0:29:00	7,125	49,68487	0,567227	13:41:01	46,614
0:30:00	7,098	49,11765	0,546218	13:42:01	46,614
0:31:00	7,072	48,57143	0,567227	13:43:01	46,614
0:32:00	7,045	48,0042	0,546218	13:44:01	46,614

0:33:00	7,019	47,45798	0,546218	13:45:01	46,614
0:34:00	6,993	46,91176	0,567227	13:46:01	46,614
0:35:00	6,966	46,34454	0,546218	13:47:01	46,614
0:36:00	6,94	45,79832	0,546218	13:48:01	46,614
0:37:00	6,914	45,2521	0,546218	13:49:01	46,614
0:38:00	6,888	44,70588	0,546218	13:50:01	46,614
0:39:00	6,862	44,15966	0,546218	13:51:01	46,614
0:40:00	6,836	43,61345	0,567227	13:52:01	46,614
0:41:00	6,809	43,04622	0,546218	13:53:01	46,614
0:42:00	6,783	42,5	0,546218	13:54:01	46,614
0:43:00	6,757	41,95378	0,546218	13:55:01	46,614
0:44:00	6,731	41,40756	0,546218	13:56:01	46,614
0:45:00	6,705	40,86134	0,546218	13:57:01	46,614
0:46:00	6,679	40,31513	0,546218	13:58:01	46,614
0:47:00	6,653	39,76891	0,546218	13:59:01	46,614
0:48:00	6,627	39,22269	0,52521	14:00:01	46,614
0:49:00	6,602	38,69748	0,546218	14:01:01	46,614
0:50:00	6,576	38,15126	0,546218	14:02:01	46,614
0:51:00	6,55	37,60504	0,52521	14:03:01	46,614
0:52:00	6,525	37,07983	0,546218	14:04:01	46,614
0:53:00	6,499	36,53361	0,546218	14:05:01	46,614
0:54:00	6,473	35,98739	0,546218	14:06:01	46,614
0:55:00	6,447	35,44118	0,52521	14:07:01	46,614
0:56:00	6,422	34,91597	0,546218	14:08:01	46,614
0:57:00	6,396	34,36975	0,52521	14:09:01	46,614
0:58:00	6,371	33,84454	0,52521	14:10:01	46,614
0:59:00	6,346	33,31933	0,52521	14:11:01	47,11
1:00:00	6,321	32,79412	0,52521	14:12:01	47,11
1:01:00	6,296	32,26891	0,52521	14:13:01	47,11
1:02:00	6,271	31,7437	0,52521	14:14:01	47,11
1:03:00	6,246	31,21849	0,52521	14:15:01	47,11
1:04:00	6,221	30,69328	0,504202	14:16:01	47,11
1:05:00	6,197	30,18908	0,52521	14:17:01	47,11
1:06:00	6,172	29,66387	0,504202	14:18:01	47,11
1:07:00	6,148	29,15966	0,504202	14:19:01	47,11
1:08:00	6,124	28,65546	0,504202	14:20:01	47,11
1:09:00	6,1	28,15126	0,504202	14:21:01	47,11
1:10:00	6,076	27,64706	0,483193	14:22:01	47,11
1:11:00	6,053	27,16387	0,483193	14:23:01	47,11
1:12:00	6,03	26,68067	0,483193	14:24:01	47,11
1:13:00	6,007	26,19748	0,462185	14:25:01	47,11
1:14:00	5,985	25,73529	0,483193	14:26:01	47,11
1:15:00	5,962	25,2521	0,462185	14:27:01	47,11
1:16:00	5,94	24,78992	0,462185	14:28:01	47,11
1:17:00	5,918	24,32773	0,441176	14:29:01	47,11

1:18:00	5,897	23,88655	0,441176	14:30:01	47,11
1:19:00	5,876	23,44538	0,462185	14:31:01	47,11
1:20:00	5,854	22,98319	0,420168	14:32:01	47,11
1:21:00	5,834	22,56303	0,441176	14:33:01	47,606
1:22:00	5,813	22,12185	0,420168	14:34:01	47,606
1:23:00	5,793	21,70168	0,420168	14:35:01	47,606
1:24:00	5,773	21,28151	0,420168	14:36:01	47,606
1:25:00	5,753	20,86134	0,420168	14:37:01	47,606
1:26:00	5,733	20,44118	0,39916	14:38:01	47,606
1:27:00	5,714	20,04202	0,39916	14:39:01	48,101
1:28:00	5,695	19,64286	0,39916	14:40:01	48,101
1:29:00	5,676	19,2437	0,39916	14:41:01	48,101
1:30:00	5,657	18,84454	0,378151	14:42:01	48,101
1:31:00	5,639	18,46639	0,378151	14:43:01	48,597
1:32:00	5,621	18,08824	0,378151	14:44:01	48,597
1:33:00	5,603	17,71008	0,378151	14:45:01	48,597
1:34:00	5,585	17,33193	0,357143	14:46:01	48,597
1:35:00	5,568	16,97479	0,378151	14:47:01	48,597
1:36:00	5,55	16,59664	0,336134	14:48:01	49,092
1:37:00	5,534	16,2605	0,378151	14:49:01	49,092
1:38:00	5,516	15,88235	0,336134	14:50:01	49,092
1:39:00	5,5	15,54622	0,357143	14:51:01	49,588
1:40:00	5,483	15,18908	0,336134	14:52:01	49,588
1:41:00	5,467	14,85294	0,336134	14:53:01	49,588
1:42:00	5,451	14,51681	0,336134	14:54:01	50,083
1:43:00	5,435	14,18067	0,336134	14:55:01	50,083
1:44:00	5,419	13,84454	0,315126	14:56:01	50,083
1:45:00	5,404	13,52941	0,336134	14:57:01	50,083
1:46:00	5,388	13,19328	0,315126	14:58:01	50,578
1:47:00	5,373	12,87815	0,315126	14:59:01	50,578
1:48:00	5,358	12,56303	0,315126	15:00:01	50,578
1:49:00	5,343	12,2479	0,294118	15:01:01	51,073
1:50:00	5,329	11,95378	0,294118	15:02:01	51,073
1:51:00	5,315	11,65966	0,294118	15:03:01	51,073
1:52:00	5,301	11,36555	0,294118	15:04:01	51,073
1:53:00	5,287	11,07143	0,294118	15:05:01	51,568
1:54:00	5,273	10,77731	0,273109	15:06:01	51,568
1:55:00	5,26	10,5042	0,273109	15:07:01	51,568
1:56:00	5,247	10,23109	0,273109	15:08:01	51,568
1:57:00	5,234	9,957983	0,273109	15:09:01	52,063
1:58:00	5,221	9,684874	0,252101	15:10:01	52,063
1:59:00	5,209	9,432773	0,252101	15:11:01	52,063
2:00:00	5,197	9,180672	0,252101	15:12:01	52,063
2:01:00	5,185	8,928571	0,252101	15:13:01	52,558
2:02:00	5,173	8,676471	0,231092	15:14:01	52,558

2:03:00	5,162	8,445378	0,231092	15:15:01	52,558
2:04:00	5,151	8,214286	0,231092	15:16:01	52,558
2:05:00	5,14	7,983193	0,231092	15:17:01	52,558
2:06:00	5,129	7,752101	0,210084	15:18:01	53,053
2:07:00	5,119	7,542017	0,210084	15:19:01	53,053
2:08:00	5,109	7,331933	0,210084	15:20:01	53,053
2:09:00	5,099	7,121849	0,210084	15:21:01	53,053
2:10:00	5,089	6,911765	0,189076	15:22:01	53,547
2:11:00	5,08	6,722689	0,210084	15:23:01	53,547
2:12:00	5,07	6,512605	0,189076	15:24:01	53,547
2:13:00	5,061	6,323529	0,168067	15:25:01	53,547
2:14:00	5,053	6,155462	0,189076	15:26:01	54,042
2:15:00	5,044	5,966387	0,168067	15:27:01	54,042
2:16:00	5,036	5,798319	0,12605	15:28:01	54,042
2:16:42	5,03	5,672269	0,189076	15:29:01	54,042
масса абс.сух.п = 4,76					

б)

Время, мин	Масса m,г	Влажность W, %	Скорость сушки, %/мин	Время сушки, t	Температура t, °C
0:00:00	8,741	64,2119	0,01	11:30:01	35,682
0:01:00	8,731	64,024	0,011	11:31:01	35,682
0:02:00	8,72	63,8174	0,015	11:32:01	32,693
0:03:00	8,705	63,5356	0,016	11:33:01	28,203
0:04:00	8,689	63,235	0,02	11:34:01	25,205
0:05:00	8,669	62,8593	0,021	11:35:01	29,701
0:06:00	8,648	62,4648	0,023	11:36:01	33,192
0:07:00	8,625	62,0327	0,024	11:37:01	36,18
0:08:00	8,601	61,5818	0,025	11:38:01	38,171
0:09:00	8,576	61,1122	0,027	11:39:01	40,16
0:10:00	8,549	60,6049	0,026	11:40:01	41,651
0:11:00	8,523	60,1165	0,027	11:41:01	42,644
0:12:00	8,496	59,6092	0,027	11:42:01	43,637
0:13:00	8,469	59,102	0,027	11:43:01	44,133
0:14:00	8,442	58,5948	0,027	11:44:01	44,63
0:15:00	8,415	58,0875	0,028	11:45:01	45,126
0:16:00	8,387	57,5615	0,027	11:46:01	45,622
0:17:00	8,36	57,0543	0,028	11:47:01	45,622
0:18:00	8,332	56,5283	0,027	11:48:01	45,622
0:19:00	8,305	56,021	0,027	11:49:01	45,622
0:20:00	8,278	55,5138	0,027	11:50:01	46,118
0:21:00	8,251	55,0066	0,027	11:51:01	46,118
0:22:00	8,224	54,4993	0,027	11:52:01	46,118
0:23:00	8,197	53,9921	0,028	11:53:01	46,118

0:24:00	8,169	53,4661	0,027	11:54:01	46,118
0:25:00	8,142	52,9589	0,027	11:55:01	46,118
0:26:00	8,115	52,4516	0,026	11:56:01	46,118
0:27:00	8,089	51,9632	0,027	11:57:01	46,118
0:28:00	8,062	51,4559	0,027	11:58:01	46,118
0:29:00	8,035	50,9487	0,026	11:59:01	46,118
0:30:00	8,009	50,4603	0,026	12:00:01	46,118
0:31:00	7,983	49,9718	0,026	12:01:01	46,118
0:32:00	7,957	49,4834	0,026	12:02:01	46,118
0:33:00	7,931	48,9949	0,026	12:03:01	46,118
0:34:00	7,905	48,5065	0,026	12:04:01	46,118
0:35:00	7,879	48,018	0,026	12:05:01	46,118
0:36:00	7,853	47,5296	0,026	12:06:01	46,118
0:37:00	7,827	47,0411	0,025	12:07:01	46,118
0:38:00	7,802	46,5715	0,026	12:08:01	46,118
0:39:00	7,776	46,083	0,025	12:09:01	46,118
0:40:00	7,751	45,6134	0,026	12:10:01	46,118
0:41:00	7,725	45,1249	0,026	12:11:01	46,118
0:42:00	7,699	44,6365	0,025	12:12:01	46,118
0:43:00	7,674	44,1668	0,025	12:13:01	46,118
0:44:00	7,649	43,6972	0,026	12:14:01	46,614
0:45:00	7,623	43,2087	0,025	12:15:01	46,118
0:46:00	7,598	42,7391	0,025	12:16:01	46,118
0:47:00	7,573	42,2694	0,026	12:17:01	46,118
0:48:00	7,547	41,781	0,025	12:18:01	46,614
0:49:00	7,522	41,3113	0,025	12:19:01	46,118
0:50:00	7,497	40,8416	0,026	12:20:01	46,118
0:51:00	7,471	40,3532	0,025	12:21:01	46,118
0:52:00	7,446	39,8835	0,025	12:22:01	46,118
0:53:00	7,421	39,4139	0,025	12:23:01	46,614
0:54:00	7,396	38,9442	0,025	12:24:01	46,614
0:55:00	7,371	38,4745	0,025	12:25:01	46,614
0:56:00	7,346	38,0049	0,025	12:26:01	46,118
0:57:00	7,321	37,5352	0,025	12:27:01	46,614
0:58:00	7,296	37,0656	0,025	12:28:01	46,614
0:59:00	7,271	36,5959	0,024	12:29:01	46,614
1:00:00	7,247	36,145	0,025	12:30:01	46,614
1:01:00	7,222	35,6754	0,024	12:31:01	46,614
1:02:00	7,198	35,2245	0,024	12:32:01	46,614
1:03:00	7,174	34,7736	0,025	12:33:01	46,118
1:04:00	7,149	34,304	0,025	12:34:01	46,118
1:05:00	7,124	33,8343	0,025	12:35:01	46,118
1:06:00	7,099	33,3646	0,024	12:36:01	46,118
1:07:00	7,075	32,9138	0,024	12:37:01	46,118
1:08:00	7,051	32,4629	0,025	12:38:01	46,118

1:09:00	7,026	31,9932	0,024	12:39:01	46,118
1:10:00	7,002	31,5424	0,025	12:40:01	46,118
1:11:00	6,977	31,0727	0,024	12:41:01	46,614
1:12:00	6,953	30,6218	0,024	12:42:01	46,614
1:13:00	6,929	30,171	0,024	12:43:01	46,118
1:14:00	6,905	29,7201	0,024	12:44:01	46,118
1:15:00	6,881	29,2692	0,024	12:45:01	46,118
1:16:00	6,857	28,8183	0,024	12:46:01	46,118
1:17:00	6,833	28,3675	0,023	12:47:01	46,118
1:18:00	6,81	27,9354	0,024	12:48:01	46,118
1:19:00	6,786	27,4845	0,023	12:49:01	46,118
1:20:00	6,763	27,0524	0,023	12:50:01	46,118
1:21:00	6,74	26,6203	0,023	12:51:01	46,118
1:22:00	6,717	26,1882	0,022	12:52:01	46,118
1:23:00	6,695	25,7749	0,023	12:53:01	46,118
1:24:00	6,672	25,3429	0,022	12:54:01	46,118
1:25:00	6,65	24,9296	0,022	12:55:01	46,118
1:26:00	6,628	24,5163	0,021	12:56:01	46,118
1:27:00	6,607	24,1217	0,022	12:57:01	46,118
1:28:00	6,585	23,7084	0,021	12:58:01	46,614
1:29:00	6,564	23,3139	0,021	12:59:01	46,614
1:30:00	6,543	22,9194	0,021	13:00:01	46,614
1:31:00	6,522	22,5249	0,02	13:01:01	46,614
1:32:00	6,502	22,1492	0,021	13:02:01	46,614
1:33:00	6,481	21,7546	0,02	13:03:01	46,614
1:34:00	6,461	21,3789	0,019	13:04:01	46,614
1:35:00	6,442	21,022	0,02	13:05:01	46,614
1:36:00	6,422	20,6463	0,019	13:06:01	47,11
1:37:00	6,403	20,2893	0,019	13:07:01	47,11
1:38:00	6,384	19,9324	0,019	13:08:01	47,11
1:39:00	6,365	19,5754	0,019	13:09:01	47,11
1:40:00	6,346	19,2185	0,018	13:10:01	47,11
1:41:00	6,328	18,8803	0,018	13:11:01	47,11
1:42:00	6,31	18,5422	0,018	13:12:01	47,606
1:43:00	6,292	18,204	0,018	13:13:01	47,606
1:44:00	6,274	17,8659	0,017	13:14:01	47,606
1:45:00	6,257	17,5465	0,018	13:15:01	47,606
1:46:00	6,239	17,2083	0,017	13:16:01	48,101
1:47:00	6,222	16,889	0,017	13:17:01	48,101
1:48:00	6,205	16,5696	0,017	13:18:01	48,101
1:49:00	6,188	16,2502	0,016	13:19:01	48,101
1:50:00	6,172	15,9497	0,017	13:20:01	48,101
1:51:00	6,155	15,6303	0,016	13:21:01	48,597
1:52:00	6,139	15,3297	0,016	13:22:01	48,597
1:53:00	6,123	15,0291	0,016	13:23:01	48,597

1:54:00	6,107	14,7285	0,015	13:24:01	49,092
1:55:00	6,092	14,4467	0,016	13:25:01	49,092
1:56:00	6,076	14,1462	0,015	13:26:01	49,092
1:57:00	6,061	13,8644	0,015	13:27:01	49,092
1:58:00	6,046	13,5826	0,015	13:28:01	49,588
1:59:00	6,031	13,3008	0,015	13:29:01	49,588
2:00:00	6,016	13,019	0,015	13:30:01	49,588
2:01:00	6,001	12,7372	0,014	13:31:01	49,588
2:02:00	5,987	12,4742	0,014	13:32:01	50,083
2:03:00	5,973	12,2112	0,014	13:33:01	50,083
2:04:00	5,959	11,9481	0,014	13:34:01	50,083
2:05:00	5,945	11,6851	0,014	13:35:01	50,083
2:06:00	5,931	11,4221	0,014	13:36:01	50,578
2:07:00	5,917	11,1591	0,014	13:37:01	50,578
2:08:00	5,903	10,8961	0,013	13:38:01	50,578
2:09:00	5,89	10,6519	0,013	13:39:01	50,578
2:10:00	5,877	10,4077	0,013	13:40:01	51,073
2:11:00	5,864	10,1634	0,012	13:41:01	51,073
2:12:00	5,852	9,938	0,013	13:42:01	51,073
2:13:00	5,839	9,69378	0,012	13:43:01	51,073
2:14:00	5,827	9,46834	0,012	13:44:01	51,568
2:15:00	5,815	9,24291	0,012	13:45:01	51,568
2:16:00	5,803	9,01747	0,012	13:46:01	51,568
2:17:00	5,791	8,79203	0,012	13:47:01	51,568
2:18:00	5,779	8,5666	0,011	13:48:01	51,568
2:19:00	5,768	8,35995	0,011	13:49:01	52,063
2:20:00	5,757	8,1533	0,011	13:50:01	52,063
2:21:00	5,746	7,94665	0,011	13:51:01	52,063
2:22:00	5,735	7,74	0,011	13:52:01	52,063
2:23:00	5,724	7,53335	0,01	13:53:01	52,558
2:24:00	5,714	7,34548	0,01	13:54:01	52,558
2:25:00	5,704	7,15762	0,01	13:55:01	52,558
2:26:00	5,694	6,96975	0,01	13:56:01	52,558
2:27:00	5,684	6,78189	0,009	13:57:01	52,558
2:28:00	5,675	6,61281	0,01	13:58:01	53,053
2:29:00	5,665	6,42495	0,009	13:59:01	53,053
2:30:00	5,656	6,25587	0,009	14:00:01	53,053
2:31:00	5,647	6,08679	0,009	14:01:01	53,053
2:32:00	5,638	5,91772	0,008	14:02:01	53,547
2:32:56	5,63	5,76742	0,006	14:03:01	53,547
масса абс.сух.п = 5,323г					

в)

Время, мин	Масса m,г	Влажность W, %	Скорость сушки, %/мин	Время сушки, t	Температура t, °C
0:00:00	8,413	61,2613	0,033	11:59:01	34,188
0:01:00	8,38	60,6287	0,04	12:00:01	43,141
0:02:00	8,34	59,862	0,043	12:01:01	48,101
0:03:00	8,297	59,0378	0,045	12:02:01	50,083
0:04:00	8,252	58,1752	0,043	12:03:01	51,073
0:05:00	8,209	57,351	0,042	12:04:01	51,073
0:06:00	8,167	56,5459	0,04	12:05:01	51,073
0:07:00	8,127	55,7792	0,038	12:06:01	50,083
0:08:00	8,089	55,0508	0,037	12:07:01	49,588
0:09:00	8,052	54,3416	0,035	12:08:01	49,092
0:10:00	8,017	53,6707	0,034	12:09:01	48,597
0:11:00	7,983	53,019	0,032	12:10:01	48,101
0:12:00	7,951	52,4056	0,031	12:11:01	47,606
0:13:00	7,92	51,8114	0,03	12:12:01	47,11
0:14:00	7,89	51,2363	0,029	12:13:01	47,11
0:15:00	7,861	50,6805	0,029	12:14:01	46,614
0:16:00	7,832	50,1246	0,028	12:15:01	46,614
0:17:00	7,804	49,5879	0,027	12:16:01	46,118
0:18:00	7,777	49,0703	0,027	12:17:01	46,118
0:19:00	7,75	48,5528	0,027	12:18:01	46,118
0:20:00	7,723	48,0353	0,027	12:19:01	46,118
0:21:00	7,696	47,5177	0,026	12:20:01	46,118
0:22:00	7,67	47,0194	0,026	12:21:01	46,118
0:23:00	7,644	46,521	0,027	12:22:01	45,622
0:24:00	7,617	46,0035	0,025	12:23:01	45,622
0:25:00	7,592	45,5242	0,026	12:24:01	45,622
0:26:00	7,566	45,0259	0,026	12:25:01	45,622
0:27:00	7,54	44,5275	0,025	12:26:01	45,622
0:28:00	7,515	44,0483	0,025	12:27:01	45,622
0:29:00	7,49	43,5691	0,025	12:28:01	45,622
0:30:00	7,465	43,0899	0,025	12:29:01	45,622
0:31:00	7,44	42,6107	0,025	12:30:01	45,622
0:32:00	7,415	42,1315	0,026	12:31:01	45,622
0:33:00	7,389	41,6331	0,025	12:32:01	46,118
0:34:00	7,364	41,1539	0,025	12:33:01	46,118
0:35:00	7,339	40,6747	0,026	12:34:01	46,118
0:36:00	7,313	40,1763	0,025	12:35:01	46,118
0:37:00	7,288	39,6971	0,025	12:36:01	46,118
0:38:00	7,263	39,2179	0,025	12:37:01	46,118
0:39:00	7,238	38,7387	0,025	12:38:01	46,118
0:40:00	7,213	38,2595	0,025	12:39:01	46,118
0:41:00	7,188	37,7803	0,025	12:40:01	46,118
0:42:00	7,163	37,3011	0,024	12:41:01	46,118

0:43:00	7,139	36,8411	0,025	12:42:01	46,118
0:44:00	7,114	36,3619	0,025	12:43:01	46,118
0:45:00	7,089	35,8827	0,025	12:44:01	46,118
0:46:00	7,064	35,4035	0,025	12:45:01	46,118
0:47:00	7,039	34,9243	0,025	12:46:01	46,118
0:48:00	7,014	34,4451	0,025	12:47:01	46,118
0:49:00	6,989	33,9659	0,025	12:48:01	46,118
0:50:00	6,964	33,4867	0,024	12:49:01	46,118
0:51:00	6,94	33,0266	0,025	12:50:01	46,118
0:52:00	6,915	32,5474	0,024	12:51:01	46,118
0:53:00	6,891	32,0874	0,025	12:52:01	46,118
0:54:00	6,866	31,6082	0,025	12:53:01	46,118
0:55:00	6,841	31,129	0,024	12:54:01	46,118
0:56:00	6,817	30,669	0,025	12:55:01	46,118
0:57:00	6,792	30,1898	0,024	12:56:01	46,118
0:58:00	6,768	29,7297	0,024	12:57:01	46,118
0:59:00	6,744	29,2697	0,025	12:58:01	46,118
1:00:00	6,719	28,7905	0,024	12:59:01	46,118
1:01:00	6,695	28,3305	0,024	13:00:01	46,118
1:02:00	6,671	27,8704	0,024	13:01:01	46,118
1:03:00	6,647	27,4104	0,024	13:02:01	46,118
1:04:00	6,623	26,9504	0,024	13:03:01	46,118
1:05:00	6,599	26,4903	0,024	13:04:01	46,118
1:06:00	6,575	26,0303	0,023	13:05:01	46,118
1:07:00	6,552	25,5894	0,023	13:06:01	46,118
1:08:00	6,529	25,1486	0,024	13:07:01	46,118
1:09:00	6,505	24,6885	0,022	13:08:01	46,118
1:10:00	6,483	24,2668	0,023	13:09:01	46,614
1:11:00	6,46	23,826	0,023	13:10:01	46,614
1:12:00	6,437	23,3851	0,022	13:11:01	46,614
1:13:00	6,415	22,9634	0,022	13:12:01	46,614
1:14:00	6,393	22,5417	0,023	13:13:01	46,614
1:15:00	6,37	22,1008	0,021	13:14:01	46,614
1:16:00	6,349	21,6983	0,021	13:15:01	46,614
1:17:00	6,328	21,2958	0,022	13:16:01	46,614
1:18:00	6,306	20,8741	0,021	13:17:01	47,11
1:19:00	6,285	20,4715	0,021	13:18:01	47,11
1:20:00	6,264	20,069	0,02	13:19:01	47,11
1:21:00	6,244	19,6856	0,021	13:20:01	47,11
1:22:00	6,223	19,2831	0,02	13:21:01	47,11
1:23:00	6,203	18,8998	0,02	13:22:01	47,11
1:24:00	6,183	18,5164	0,019	13:23:01	47,11
1:25:00	6,164	18,1522	0,019	13:24:01	47,606
1:26:00	6,145	17,788	0,019	13:25:01	47,606
1:27:00	6,126	17,4238	0,019	13:26:01	47,606

1:28:00	6,107	17,0596	0,019	13:27:01	47,606
1:29:00	6,088	16,6954	0,018	13:28:01	48,101
1:30:00	6,07	16,3504	0,018	13:29:01	48,101
1:31:00	6,052	16,0054	0,018	13:30:01	48,101
1:32:00	6,034	15,6603	0,018	13:31:01	48,101
1:33:00	6,016	15,3153	0,017	13:32:01	48,597
1:34:00	5,999	14,9895	0,018	13:33:01	48,597
1:35:00	5,981	14,6444	0,017	13:34:01	48,597
1:36:00	5,964	14,3186	0,016	13:35:01	49,092
1:37:00	5,948	14,0119	0,017	13:36:01	49,092
1:38:00	5,931	13,686	0,016	13:37:01	49,092
1:39:00	5,915	13,3793	0,016	13:38:01	49,588
1:40:00	5,899	13,0726	0,016	13:39:01	49,588
1:41:00	5,883	12,766	0,016	13:40:01	49,588
1:42:00	5,867	12,4593	0,015	13:41:01	50,083
1:43:00	5,852	12,1717	0,016	13:42:01	50,083
1:44:00	5,836	11,8651	0,015	13:43:01	50,083
1:45:00	5,821	11,5775	0,014	13:44:01	50,578
1:46:00	5,807	11,3092	0,015	13:45:01	50,578
1:47:00	5,792	11,0217	0,014	13:46:01	50,578
1:48:00	5,778	10,7533	0,014	13:47:01	50,578
1:49:00	5,764	10,485	0,014	13:48:01	51,073
1:50:00	5,75	10,2166	0,014	13:49:01	51,073
1:51:00	5,736	9,94825	0,013	13:50:01	51,073
1:52:00	5,723	9,69906	0,013	13:51:01	51,073
1:53:00	5,71	9,44988	0,013	13:52:01	51,568
1:54:00	5,697	9,20069	0,013	13:53:01	51,568
1:55:00	5,684	8,9515	0,012	13:54:01	51,568
1:56:00	5,672	8,72149	0,013	13:55:01	52,063
1:57:00	5,659	8,4723	0,012	13:56:01	52,063
1:58:00	5,647	8,24228	0,012	13:57:01	52,063
1:59:00	5,635	8,01227	0,012	13:58:01	52,558
2:00:00	5,623	7,78225	0,011	13:59:01	52,558
2:01:00	5,612	7,5714	0,012	14:00:01	52,558
2:02:00	5,6	7,34138	0,011	14:01:01	53,053
2:03:00	5,589	7,13053	0,011	14:02:01	53,053
2:04:00	5,578	6,91969	0,01	14:03:01	53,053
2:05:00	5,568	6,728	0,011	14:04:01	53,053
2:06:00	5,557	6,51716	0,01	14:05:01	53,547
2:07:00	5,547	6,32547	0,01	14:06:01	53,547
2:08:00	5,537	6,13379	0,01	14:07:01	53,547
2:09:00	5,527	5,94211	0,009	14:08:01	53,547
2:10:00	5,518	5,7696	0,01	14:09:01	54,042
2:11:00	5,508	5,57792	0,009	14:10:01	54,042
2:12:00	5,499	5,40541	0,009	14:11:01	54,042

2:13:00	5,49	5,23289	0,008	14:12:01	54,042
2:14:00	5,482	5,07955	0,009	14:13:01	54,536
2:15:00	5,473	4,90703	0,009	14:14:01	54,536
масса абс.сух.п = 5,217г					

г)

Время, мин	Масса m,г	Влажность W, %	Скорость сушки, %/мин	Время сушки, t	Температура t, °C
0:00:00	9,607	44,5966	0,015	14:42:01	23,205
0:01:00	9,592	44,3709	0,02	14:43:01	32,195
0:02:00	9,572	44,0698	0,025	14:44:01	38,171
0:03:00	9,547	43,6936	0,027	14:45:01	41,651
0:04:00	9,52	43,2872	0,03	14:46:01	44,133
0:05:00	9,49	42,8356	0,03	14:47:01	45,622
0:06:00	9,46	42,3841	0,03	14:48:01	46,118
0:07:00	9,43	41,9326	0,031	14:49:01	46,614
0:08:00	9,399	41,466	0,031	14:50:01	47,11
0:09:00	9,368	40,9994	0,03	14:51:01	47,11
0:10:00	9,338	40,5479	0,03	14:52:01	47,11
0:11:00	9,308	40,0963	0,029	14:53:01	47,11
0:12:00	9,279	39,6598	0,03	14:54:01	47,11
0:13:00	9,249	39,2083	0,028	14:55:01	47,11
0:14:00	9,221	38,7869	0,029	14:56:01	47,11
0:15:00	9,192	38,3504	0,028	14:57:01	47,11
0:16:00	9,164	37,929	0,027	14:58:01	46,614
0:17:00	9,137	37,5226	0,027	14:59:01	46,614
0:18:00	9,11	37,1162	0,028	15:00:01	46,614
0:19:00	9,082	36,6948	0,027	15:01:01	46,614
0:20:00	9,055	36,2884	0,027	15:02:01	46,614
0:21:00	9,028	35,882	0,027	15:03:01	46,614
0:22:00	9,001	35,4756	0,027	15:04:01	46,614
0:23:00	8,974	35,0692	0,027	15:05:01	46,614
0:24:00	8,947	34,6629	0,026	15:06:01	46,614
0:25:00	8,921	34,2715	0,027	15:07:01	46,614
0:26:00	8,894	33,8651	0,027	15:08:01	46,614
0:27:00	8,867	33,4588	0,026	15:09:01	46,614
0:28:00	8,841	33,0674	0,027	15:10:01	46,614
0:29:00	8,814	32,661	0,027	15:11:01	46,614
0:30:00	8,787	32,2547	0,026	15:12:01	46,614
0:31:00	8,761	31,8633	0,027	15:13:01	46,614
0:32:00	8,734	31,457	0,026	15:14:01	46,614
0:33:00	8,708	31,0656	0,026	15:15:01	46,614
0:34:00	8,682	30,6743	0,026	15:16:01	46,614
0:35:00	8,656	30,283	0,027	15:17:01	46,614

0:36:00	8,629	29,8766	0,026	15:18:01	46,614
0:37:00	8,603	29,4852	0,026	15:19:01	46,614
0:38:00	8,577	29,0939	0,026	15:20:01	46,614
0:39:00	8,551	28,7026	0,025	15:21:01	46,614
0:40:00	8,526	28,3263	0,026	15:22:01	46,614
0:41:00	8,5	27,935	0,026	15:23:01	46,614
0:42:00	8,474	27,5436	0,026	15:24:01	46,614
0:43:00	8,448	27,1523	0,026	15:25:01	46,614
0:44:00	8,422	26,761	0,025	15:26:01	46,614
0:45:00	8,397	26,3847	0,025	15:27:01	46,614
0:46:00	8,372	26,0084	0,025	15:28:01	46,614
0:47:00	8,347	25,6321	0,025	15:29:01	46,614
0:48:00	8,322	25,2559	0,025	15:30:01	46,614
0:49:00	8,297	24,8796	0,025	15:31:01	46,614
0:50:00	8,272	24,5033	0,025	15:32:01	46,614
0:51:00	8,247	24,127	0,025	15:33:01	46,614
0:52:00	8,222	23,7508	0,026	15:34:01	46,614
0:53:00	8,196	23,3594	0,025	15:35:01	46,614
0:54:00	8,171	22,9831	0,025	15:36:01	46,614
0:55:00	8,146	22,6069	0,025	15:37:01	46,614
0:56:00	8,121	22,2306	0,024	15:38:01	46,614
0:57:00	8,097	21,8694	0,025	15:39:01	46,614
0:58:00	8,072	21,4931	0,025	15:40:01	46,614
0:59:00	8,047	21,1168	0,025	15:41:01	46,614
1:00:00	8,022	20,7405	0,024	15:42:01	46,614
1:01:00	7,998	20,3793	0,025	15:43:01	46,614
1:02:00	7,973	20,003	0,024	15:44:01	46,614
1:03:00	7,949	19,6418	0,025	15:45:01	46,614
1:04:00	7,924	19,2655	0,025	15:46:01	46,614
1:05:00	7,899	18,8892	0,024	15:47:01	46,614
1:06:00	7,875	18,528	0,024	15:48:01	46,614
1:07:00	7,851	18,1668	0,025	15:49:01	46,614
1:08:00	7,826	17,7905	0,024	15:50:01	46,614
1:09:00	7,802	17,4293	0,024	15:51:01	46,614
1:10:00	7,778	17,068	0,024	15:52:01	46,614
1:11:00	7,754	16,7068	0,024	15:53:01	46,614
1:12:00	7,73	16,3456	0,024	15:54:01	46,614
1:13:00	7,706	15,9843	0,024	15:55:01	46,614
1:14:00	7,682	15,6231	0,023	15:56:01	46,614
1:15:00	7,659	15,2769	0,022	15:57:01	46,614
1:16:00	7,637	14,9458	0,023	15:58:01	46,614
1:17:00	7,614	14,5996	0,022	15:59:01	46,614
1:18:00	7,592	14,2685	0,022	16:00:01	46,614
1:19:00	7,57	13,9374	0,021	16:01:01	46,614
1:20:00	7,549	13,6213	0,021	16:02:01	47,11

1:21:00	7,528	13,3052	0,021	16:03:01	47,11
1:22:00	7,507	12,9892	0,02	16:04:01	47,11
1:23:00	7,487	12,6881	0,02	16:05:01	47,11
1:24:00	7,467	12,3871	0,02	16:06:01	47,11
1:25:00	7,447	12,0861	0,019	16:07:01	47,606
1:26:00	7,428	11,8001	0,019	16:08:01	47,606
1:27:00	7,409	11,5141	0,018	16:09:01	47,606
1:28:00	7,391	11,2432	0,018	16:10:01	48,101
1:29:00	7,373	10,9723	0,018	16:11:01	48,101
1:30:00	7,355	10,7014	0,018	16:12:01	48,101
1:31:00	7,337	10,4305	0,017	16:13:01	48,597
1:32:00	7,32	10,1746	0,017	16:14:01	48,597
1:33:00	7,303	9,91872	0,016	16:15:01	49,092
1:34:00	7,287	9,6779	0,016	16:16:01	49,092
1:35:00	7,271	9,43709	0,016	16:17:01	49,092
1:36:00	7,255	9,19627	0,015	16:18:01	49,588
1:37:00	7,24	8,9705	0,016	16:19:01	49,588
1:38:00	7,224	8,72968	0,015	16:20:01	50,083
1:39:00	7,209	8,50391	0,014	16:21:01	50,083
1:40:00	7,195	8,2932	0,015	16:22:01	50,578
1:41:00	7,18	8,06743	0,014	16:23:01	50,578
1:42:00	7,166	7,85671	0,014	16:24:01	50,578
1:43:00	7,152	7,646	0,014	16:25:01	51,073
1:44:00	7,138	7,43528	0,014	16:26:01	51,073
1:45:00	7,124	7,22456	0,013	16:27:01	51,073
1:46:00	7,111	7,0289	0,013	16:28:01	51,568
1:47:00	7,098	6,83323	0,012	16:29:01	51,568
1:48:00	7,086	6,65262	0,013	16:30:01	51,568
1:49:00	7,073	6,45695	0,012	16:31:01	52,063
1:50:00	7,061	6,27634	0,012	16:32:01	52,063
1:51:00	7,049	6,09573	0,012	16:33:01	52,558
1:52:00	7,037	5,91511	0,012	16:34:01	52,558
1:53:00	7,025	5,7345	0,011	16:35:01	52,558
1:54:00	7,014	5,56893	0,011	16:36:01	53,053
1:55:00	7,003	5,40337	0,011	16:37:01	53,053
1:56:00	6,992	5,23781	0,01	16:38:01	53,053
1:57:00	6,982	5,0873	0,01	16:39:01	53,053
1:58:00	6,972	4,93679	0,01	16:40:01	53,547
1:59:00	6,962	4,78627	0,01	16:41:01	53,547
2:00:00	6,952	4,63576	0,006	16:42:01	54,042
2:00:38	6,946	4,54545	0,029	16:43:01	54,042
масса абс.сух.п = 6,644г					

д)

Время, мин	Масса m,г	Влажность W, %	Скорость сушки, %/мин	Время сушки, t	Температура t, °C
0:00:00	9,251	40,7424	0,18257	13:59:01	30,2
0:01:00	9,239	40,5599	0,21299	14:00:01	34,686
0:02:00	9,225	40,3469	0,25863	14:01:01	37,673
0:03:00	9,208	40,0882	0,28906	14:02:01	40,16
0:04:00	9,189	39,7992	0,3347	14:03:01	41,651
0:05:00	9,167	39,4645	0,36513	14:04:01	43,141
0:06:00	9,143	39,0993	0,39556	14:05:01	43,637
0:07:00	9,117	38,7038	0,39556	14:06:01	44,133
0:08:00	9,091	38,3082	0,39556	14:07:01	44,63
0:09:00	9,065	37,9127	0,41077	14:08:01	45,126
0:10:00	9,038	37,5019	0,42599	14:09:01	45,126
0:11:00	9,01	37,0759	0,42599	14:10:01	45,126
0:12:00	8,982	36,6499	0,42599	14:11:01	45,126
0:13:00	8,954	36,2239	0,42599	14:12:01	45,622
0:14:00	8,926	35,798	0,42599	14:13:01	45,622
0:15:00	8,898	35,372	0,41077	14:14:01	45,622
0:16:00	8,871	34,9612	0,42599	14:15:01	45,622
0:17:00	8,843	34,5352	0,42599	14:16:01	45,622
0:18:00	8,815	34,1092	0,41077	14:17:01	45,622
0:19:00	8,788	33,6985	0,41077	14:18:01	45,622
0:20:00	8,761	33,2877	0,42599	14:19:01	45,622
0:21:00	8,733	32,8617	0,41077	14:20:01	45,622
0:22:00	8,706	32,4509	0,41077	14:21:01	45,622
0:23:00	8,679	32,0402	0,42599	14:22:01	45,622
0:24:00	8,651	31,6142	0,41077	14:23:01	45,622
0:25:00	8,624	31,2034	0,41077	14:24:01	45,622
0:26:00	8,597	30,7926	0,39556	14:25:01	45,622
0:27:00	8,571	30,3971	0,42599	14:26:01	46,118
0:28:00	8,543	29,9711	0,41077	14:27:01	46,118
0:29:00	8,516	29,5603	0,41077	14:28:01	46,118
0:30:00	8,489	29,1496	0,42599	14:29:01	45,622
0:31:00	8,461	28,7236	0,39556	14:30:01	45,622
0:32:00	8,435	28,328	0,41077	14:31:01	45,622
0:33:00	8,408	27,9172	0,41077	14:32:01	46,118
0:34:00	8,381	27,5065	0,41077	14:33:01	46,118
0:35:00	8,354	27,0957	0,41077	14:34:01	45,622
0:36:00	8,327	26,6849	0,41077	14:35:01	45,622
0:37:00	8,3	26,2742	0,41077	14:36:01	45,622
0:38:00	8,273	25,8634	0,39556	14:37:01	45,622
0:39:00	8,247	25,4678	0,41077	14:38:01	46,118
0:40:00	8,22	25,0571	0,39556	14:39:01	46,118
0:41:00	8,194	24,6615	0,39556	14:40:01	46,118
0:42:00	8,168	24,2659	0,39556	14:41:01	46,118

0:43:00	8,142	23,8704	0,39556	14:42:01	46,118
0:44:00	8,116	23,4748	0,39556	14:43:01	46,118
0:45:00	8,09	23,0793	0,41077	14:44:01	46,118
0:46:00	8,063	22,6685	0,39556	14:45:01	46,118
0:47:00	8,037	22,2729	0,39556	14:46:01	46,118
0:48:00	8,011	21,8774	0,39556	14:47:01	46,118
0:49:00	7,985	21,4818	0,39556	14:48:01	46,118
0:50:00	7,959	21,0863	0,39556	14:49:01	46,118
0:51:00	7,933	20,6907	0,38034	14:50:01	46,118
0:52:00	7,908	20,3104	0,38034	14:51:01	46,118
0:53:00	7,883	19,93	0,38034	14:52:01	46,118
0:54:00	7,858	19,5497	0,39556	14:53:01	46,614
0:55:00	7,832	19,1541	0,38034	14:54:01	46,614
0:56:00	7,807	18,7738	0,38034	14:55:01	46,614
0:57:00	7,782	18,3934	0,38034	14:56:01	46,614
0:58:00	7,757	18,0131	0,36513	14:57:01	46,614
0:59:00	7,733	17,648	0,38034	14:58:01	46,614
1:00:00	7,708	17,2676	0,36513	14:59:01	46,614
1:01:00	7,684	16,9025	0,36513	15:00:01	46,614
1:02:00	7,66	16,5373	0,36513	15:01:01	46,614
1:03:00	7,636	16,1722	0,34992	15:02:01	46,614
1:04:00	7,613	15,8223	0,36513	15:03:01	46,614
1:05:00	7,589	15,4572	0,34992	15:04:01	46,614
1:06:00	7,566	15,1073	0,34992	15:05:01	46,614
1:07:00	7,543	14,7573	0,34992	15:06:01	46,614
1:08:00	7,52	14,4074	0,3347	15:07:01	46,614
1:09:00	7,498	14,0727	0,3347	15:08:01	46,614
1:10:00	7,476	13,738	0,3347	15:09:01	47,11
1:11:00	7,454	13,4033	0,31949	15:10:01	47,11
1:12:00	7,433	13,0838	0,31949	15:11:01	47,11
1:13:00	7,412	12,7643	0,31949	15:12:01	47,11
1:14:00	7,391	12,4449	0,30428	15:13:01	47,11
1:15:00	7,371	12,1406	0,30428	15:14:01	47,606
1:16:00	7,351	11,8363	0,30428	15:15:01	47,606
1:17:00	7,331	11,532	0,28906	15:16:01	47,606
1:18:00	7,312	11,243	0,27385	15:17:01	47,606
1:19:00	7,294	10,9691	0,28906	15:18:01	48,101
1:20:00	7,275	10,6801	0,27385	15:19:01	48,101
1:21:00	7,257	10,4062	0,27385	15:20:01	48,101
1:22:00	7,239	10,1324	0,25863	15:21:01	48,597
1:23:00	7,222	9,87373	0,25863	15:22:01	48,597
1:24:00	7,205	9,61509	0,25863	15:23:01	49,092
1:25:00	7,188	9,35646	0,24342	15:24:01	49,092
1:26:00	7,172	9,11304	0,24342	15:25:01	49,588
1:27:00	7,156	8,86962	0,24342	15:26:01	49,588

1:28:00	7,14	8,6262	0,24342	15:27:01	50,083
1:29:00	7,124	8,38278	0,21299	15:28:01	50,083
1:30:00	7,11	8,16979	0,22821	15:29:01	50,083
1:31:00	7,095	7,94158	0,22821	15:30:01	50,578
1:32:00	7,08	7,71337	0,21299	15:31:01	50,578
1:33:00	7,066	7,50038	0,21299	15:32:01	51,073
1:34:00	7,052	7,28739	0,19778	15:33:01	51,073
1:35:00	7,039	7,08961	0,21299	15:34:01	51,568
1:36:00	7,025	6,87662	0,19778	15:35:01	51,568
1:37:00	7,012	6,67884	0,18257	15:36:01	52,063
1:38:00	7	6,49627	0,19778	15:37:01	52,063
1:39:00	6,987	6,29849	0,18257	15:38:01	52,063
1:40:00	6,975	6,11593	0,18257	15:39:01	52,558
1:41:00	6,963	5,93336	0,18257	15:40:01	52,558
1:42:00	6,951	5,7508	0,16735	15:41:01	52,558
1:43:00	6,94	5,58345	0,16735	15:42:01	53,053
1:44:00	6,929	5,4161	0,16735	15:43:01	53,053
1:45:00	6,918	5,24874	0,16735	15:44:01	53,547
1:46:00	6,907	5,08139	0,15214	15:45:01	53,547
1:47:00	6,897	4,92926	0,15214	15:46:01	54,042
1:48:00	6,887	4,77712	0,15214	15:47:01	54,042
1:49:00	6,877	4,62498	0,15214	15:48:01	54,042
1:50:00	6,867	4,47284	0,12171	15:49:01	54,536
1:50:54	6,859	4,35113	4,35113	15:58:01	65,882
масса абс.сух.п = 6,573г					

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

a)	Model is: $\text{var1}=(\text{var2}/b2)^{**}(-b1)$ (Spreadsheet22)						
	Dep. Var. : Var1						
	Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 2	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit	
b2	45,5149	1,29047	35,2697	0,00080	39,9624	51,0673	
b1	7,6420	1,59897	4,7793	0,04109	0,7621	14,5218	

б)	Model is: $\text{var1}=(\text{var2}/b2)^{**}(-b1)$ (Spreadsheet22)						
	Dep. Var. : Var1						
	Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 2	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit	
b2	50,9954	0,55776	91,4279	0,00012	48,5955	53,3953	
b1	23,6214	5,43993	4,3422	0,04915	0,2153	47,0275	

в)	Model is: $\text{var2}=(\text{var1}/b2)^{**}(-b1)$ (gixfgdfhfcfh)						
	Dep. Var. : Var2						
	Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 2	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit	
b2	39,0883	0,84444	46,2889	0,00046	35,4550	42,7217	
b1	7,5250	0,68311	11,0157	0,00814	4,5858	10,4642	

г)	Model is: $\text{var2}=(\text{var1}/b2)^{**}(-b1)$ (gixfgdfhfcfh)						
	Dep. Var. : Var2						
	Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 2	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit	
b2	20,7405	1,14887	18,0529	0,00305	15,7973	25,6838	
b1	3,9000	0,63739	6,1186	0,02568	1,1575	6,6425	

д)	Model is: $\text{var2}=(\text{var1}/b2)^{**}(-b1)$ (gixfgdfhfcfh)						
	Dep. Var. : Var2						
	Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 2	p-level	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit	
b2	32,0410	0,21619	148,204	0,00004	31,1108	32,9712	
b1	15,5002	1,68557	9,195	0,01162	8,2478	22,7526	

Summary: Parameter estimation

Рис 1. Данные аппроксимации параметров b_1 и b_2

$p\text{-level} > 0,05$, параметры значимы (а-степь, б-дубрава, в-лесополоса, г-пашня, д-пар).