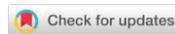


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-108-148



Ссылки для цитирования:

Клюева В.В., Хайдапова Д.Д. Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 108-148. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-108-148

Cite this article as:

Klyueva V.V., Khaydarova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 103, pp. 108-148, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-108-148

Благодарность:

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16–04–01111 и с привлечением оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ.

Acknowledgments:

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16–04–01111) and with the use of equipment purchased under the Moscow State University Development Program.

Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния

© 2020 г. В. В. Клюева^{1*}, Д. Д. Хайдапова²

¹ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0003-4823-444X>, e-mail: vyklyueva@gmail.com.

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр.12.

Поступила в редакцию 23.04.2020, после доработки 25.04.2020,
принята к публикации 10.09.2020

Резюме: Методом осцилляционной амплитудной развертки изучены реологические показатели естественных и пахотных дерново-подзолистых

почв и черноземов миграционно-мицеллярных. Установлено, что показатели сдвиговой устойчивости изученных почв (напряжения сдвига в конце диапазона линейной вязкоупругости LVE-range τ_L , τ_F в точке пересечения модулей накопления и потерь Crossover и максимальное значение τ_{max}) были более информативны при сравнении естественных и пахотных почв и демонстрировали выраженные отличия между генетическими горизонтами в отличие от показателей вязкоупругости (деформации γ_L , характеризующей область упругого поведения, и интегральной зоны Z). Сельскохозяйственное использование изученных почв привело к снижению содержания органического углерода и, как следствие, к уменьшению вязкоупругости и сдвиговой устойчивости почв, а повышенная плотность пахотных горизонтов и перераспределение физической глины проявились в слабой дифференциации значений реологических показателей по глубине при их максимуме в верхнем горизонте. Предложенные и изученные в данной работе реологические показатели при активном использовании в будущем могут позволить более подробно и детально изучить характер и прочность межчастичных связей, процессы, происходящие в почвах при воздействии сельскохозяйственной техники. Встраивание реологических показателей в систему физических показателей трансформации структурного состояния почв является дальнейшим направлением их изучения.

Ключевые слова: реология, вязкоупругие свойства, структура и устойчивость почвы, индикатор.

Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes

V. V. Klyueva^{1*}, D. D. Khaydapova²

¹Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0003-4823-444X>, e-mail: vyklyueva@gmail.com.

²Lomonosov Moscow State University,
12 Bld. 1 Leninskie Gori, Moscow 119234, Russian Federation.

Received 23.04.2020, Revised 25.04.2020, Accepted 10.09.2020

Abstract: The rheological parameters of structured soddy-podzolic soils (Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic)) and chernozems (Haplic Chernozems (Loamic, Pachic)) in their natural state and involved in agricultural use were studied by the oscillation amplitude sweep test. Shear resistance parameters of

the studied soils (shear stress at the end of the linear viscoelasticity range – LVE-range τ_L , shear stress τ_F at the Crossover point and maximum shear stress τ_{max}) were more informative and indicated pronounced differences between soil genetic horizons in contrast to viscoelasticity parameters (deformation γ_L at the end of the LVE-range and the integral zone Z) when comparing natural and arable soils. The agricultural land use resulted in decreased organic carbon content and, as a consequence, reduced viscoelasticity and shear resistance of the soils. At the same time, the higher bulk density of arable horizons and the redistribution of fine soil particles (physical clay) could explain maximal values of the rheological parameters in the upper arable horizons and their slight differentiation with depth. Further development in the application of the proposed and studied rheological parameters can give insight into the nature and strength evaluation of interparticle bonds, the soil processes under the impact of agricultural machinery, and can also be integrated into the system of physical indicators of soil structural changes.

Keywords: rheology, viscoelastic properties, soil resistance, soil structural changes.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях интенсивного сельского хозяйства почвенный покров испытывает серьезные нагрузки, благодаря чему многочисленные компоненты почвенных систем претерпевают значительные изменения ([Bünemann et al., 2018](#); [Food security and soil quality, 2010](#)).

Среди таких компонентов можно выделить физические свойства почв. Физические свойства почв определяют их воздушный, водный и тепловой режимы, что проявляется в устойчивости почв к различным естественным и антропогенным воздействиям, урожайности выращиваемых сельскохозяйственных культур, жизнедеятельности населяющих ее организмов ([Шеин, 2005](#); [Lal, Shukla, 2004](#); [Phogat et al., 2016](#)). Многими авторами отмечается, что показатели физического состояния почв, их динамика при антропогенной нагрузке являются одними из важнейших факторов управления плодородием почв и их рациональным использованием ([Бондарев и др., 2000](#); [Сапожников, 1994](#); [Dexter, 2004](#); [Reynolds et al., 2009](#); [Shukla et al., 2006](#)). Среди таких показателей в ряде работ ([Бондарев, 2003](#); [Фрид и др., 2010](#); [Кузнецова, Скворцова, 2013](#); [Armenise et al., 2013](#); [Bünemann et al., 2018](#);

[Schoenholtz et al., 2000](#)) исследователями выделяются следующие: гранулометрический состав, структурное состояние пахотного слоя (содержание агрегатов агрономически ценного размера 0.25–10 мм, глыбистой фракции, водопрочных агрегатов крупнее 0.25 мм, пористость агрегатов 5–7 мм), сложение почвы и соответствующие величина, ориентация и форма почвенных пор, плотность почвы (равновесная и оптимальная), а также пористость (общая, дифференциальная и азрации), водопроницаемость, наименьшая влагоемкость, влаго- и теплообеспеченность. Многими коллективами отечественных и зарубежных авторов изучаются допустимые диапазоны изменения оптимальных параметров физических свойств почв, проводится оценка их допустимых и критических значений в зависимости от характера и степени антропогенного воздействия ([Фрид и др., 2010](#); [Horn et al., 2019](#); [Reynolds et al., 2002](#); [Reynolds et al., 2008](#); [Бондарев, Кузнецова, 1999](#)).

Большая часть оценки воздействия сельскохозяйственной техники, являющегося основным фактором изменения физических свойств почвы (помимо дегумификации) ([Бондарев, Кузнецова, 1999](#)) в российских научных работах, состоит из определения значений равновесной плотности, общей пористости, содержания водопрочных агрегатов, водопроницаемости и сопротивления пентрации ([Бондарев, 2003](#); [Фрид и др., 2010](#)).

Однако изменению физико-механических свойств (деформационных, прочностных и реологических), являющихся показателями устойчивости почвенной системы, зачастую уделяется не столь обширное внимание, и многие информативные показатели упускаются из виду. С долей уверенности можно сказать, что в настоящее время реологические показатели являются недооцененными параметрами при оценке естественной и антропогенной трансформации структурного состояния почв вследствие следующих причин:

1. Реологические параметры являются многофакторными переменными, поэтому влияние какого-либо отдельного фактора сложно анализировать. Реологическое поведение почв, как отражение их физико-механических свойств и структурных особенностей, зависит одновременно от большого количества физических, химических и биологических параметров, таких как мине-

ралоогический и гранулометрический состав, качественное и количественное содержание катионов и анионов почвенного раствора, рН среды, содержание и состав органического вещества, экссудаты микроорганизмов и растений и т. д. ([Хайдапова и др., 2016](#); [Хитров, Хайдапова, 2019](#); [Холопов и др., 2018](#); [Barré, Hallett, 2009](#); [Holthusen et al., 2017](#); [Markgraf, Horn, 2006](#); [Markgraf et al., 2012](#); [Péritable et al., 2016](#); [Péritable et al., 2018](#); [Stoppe, Horn, 2018](#)). Поэтому изменение того или иного параметра в результате естественных природных процессов или антропогенной нагрузки прямо или косвенно влечет за собой закономерное изменение реологического поведения почв в различных природных зонах и системах землепользования.

Решением этой проблемы, с одной стороны, могут быть модельные эксперименты по изучению влияния отдельного фактора на структуру и реологическое поведение, в которых осуществляется внешняя регуляция различных свойств почвенного образца, или, с другой стороны, комплексный математический и статистический анализ зависимостей между реологическими свойствами и изменяющимися параметрами.

2. Современные реологические методы, такие как реометрия, только начинают приобретать популярность в отечественных почвенных исследованиях. Однако по сравнению с традиционными вискозиметрами современные реометры различных моделей более универсальны и производительны, имеют широкий диапазон контролируемых и измеряемых параметров при относительно небольшом времени их определения.

Возможности практического применения полученных современными реологическими методами данных, их встраивание в общую систему показателей, в том числе индикаторов, с помощью которых производится оценка изменения структурного состояния почв, являются открытым вопросом, требующим тщательного анализа и детального изучения.

Исходя из вышесказанного, целью работы было изучение некоторых реологических показателей в почвах ненарушенного сложения с помощью метода амплитудной развертки и анализ возможности их использования в качестве физических показателей изменения структурного состояния почв в результате антропо-

генного воздействия.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом нашего исследования стали образцы ненарушенного сложения генетических горизонтов нескольких типов почв:

– дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы под ельником с примесью березы и агродерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы (Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic), Пушкинский район Московской области, Зеленоградский стационар Почвенного института им. В.В. Докучаева, д. Ельдигино);

– черноземов миграционно-мицеллярных и агрочерноземов миграционно-мицеллярных тяжелосуглинистых (Haplic Chernozems (Loamic, Pachic), Курский район Курской области, Центральнo-Черноземный природный биосферный заповедник им. В.А. Алехина, урочище Дубрашина и пос. Черемушки, территория Курского НИИ АПП).

Были определены следующие характеристики почв (кафедра физики и мелиорации почв факультета Почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова): гранулометрический состав почвы – методом лазерной дифракции (Analysette 22 (Fritsch, Германия)) с предварительной пятиминутной ультразвуковой диспергацией почвенной суспензии; влажность почвы – термогравиметрическим методом, анализатор влажности МХ-50 (Япония); содержание общего, органического и карбонатного углерода – методом сухого сжигания в потоке кислорода, экспресс-анализатор АН-7529 (“Измеритель”, Беларусь) ([Шейн и др., 2017](#)). Другие химические показатели были определены в исследовательском лабораторном центре Почвенного института им. В.В. Докучаева: определение рН водных вытяжек по ГОСТ 26423-85; содержание обменных катионов кальция и магния – по Шолленбергеру ([Хитров, Понизовский, 1990](#)); содержание железа – по методам Тамма (оксалатрастворимое) и Мера–Джексона (несиликатное) ([Теория и практика химического анализа почв, 2006](#)).

При изучении показателей структурного состояния почв был применен реометрический подход, а именно метод осцилляционной амплитудной развертки на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria) с измерительной системой

плато-плато РР-25 (кафедра физики и мелиорации почв факультета Почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова). В предыдущих исследованиях было показано ([Клюева, 2019](#); [Клюева, Хайдапова, 2017](#)), что при проведении реометрических исследований почвенные пасты, подготавливаемые из насыпных образцов путем свободного капиллярного насыщения в течение суток, имеют слишком высокое содержание влаги, приводящее к нечеткой выраженности различий в значениях реологических показателей генетических горизонтов. Поэтому в настоящей работе представлены данные и проанализированы результаты, полученные для почв ненарушенного сложения.

Испытания проводили при следующих технических параметрах программного обеспечения Start Rheoplus 32 V3.60 реометра MCR-302: режим контролируемой сдвиговой деформации γ с увеличивающейся амплитудой колебаний, 30 точек измерения продолжительностью 15 сек., угловая частота измерения 0.5 Гц, постоянная температура 20 °С, которая обеспечивалась элементами Пельтье. Более подробное описание метода можно найти в предыдущих исследовательских работах ([Markgraf, Horn 2006](#); [Mezger, 2014](#)). В качестве вводного параметра был использован контроль нормальной силы верхнего плато < 15 Н, благодаря чему был обеспечен максимально плотный контакт измерительных плато реометра с почвенными образцами при их минимальной деформации (при этом толщина образцов отличалась от 4 до 7 мм).

Большой ненарушенный почвенный образец вырезался в полевой экспедиции вручную, плотно упаковывался пленкой во избежание деформаций при транспортировке и хранился в холодильной камере лаборатории до начала испытаний. После этого образец ставили на капиллярное насыщение дистиллированной водой в течение трех суток. После этого с помощью скальпеля и одноразового лезвия с ровной поверхности большого ненарушенного образца, соприкасавшейся с фильтровальной бумагой, вырезался малый ненарушенный образец в полый цилиндр диаметром 25 мм, после чего он выдавливался поршнем на нижнее плато реометра. Измерения реологических показателей проведены в 4–7-кратной повторности. После окончания реометрического теста определяли влажность образца.

При испытаниях в режиме контролируемой деформации программное обеспечение реометра устанавливает параметры угла отклонения φ (deflection angle) и деформации сдвига γ (shear deformation, shear strain), равной отношению отклонения s к сдвиговому зазору h . Независимыми показателями первичной оценки являются крутящий момент M (torque) и угол сдвига δ (phase shift angle), расчетными показателями – напряжение сдвига τ (shear stress) (рис. 1) и комплексный модуль сдвига G^* (complex shear modulus). Комплексный модуль сдвига G^* представляет собой векторную сумму модуля накопления G' (упругой составляющей, storage modulus) и модуля потерь G'' (вязкой составляющей, loss modulus), фактор потерь $\tan\delta$ – отношение величин модуля потерь к модулю накопления (рис. 2) (Mezger, 2014).

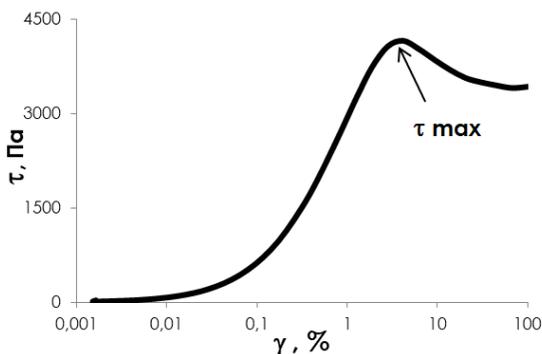


Рис. 1. Кривая напряжения сдвига, характерная для исследованных дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных ненарушенного сложения.

Fig. 1. Shear stress curve of the investigated structured soddy-podzolic soils and chernozems.

Вязкоупругие твердые тела, к которым относится почва, проявляют несколько фаз поведения своей микроструктуры (рис. 2) в осцилляционном тесте. Фаза I или зона накопленной упругости представляет собой диапазон параллельного хода кривых модулей накопления G' и потерь G'' без значительного изменения их

величин до точки yield point, но на разных уровнях. В данной области упругих обратимых деформаций структура образца не нарушается при увеличении нагрузки. Эта фаза также называется диапазоном линейной вязкоупругости или linear viscoelastic range (LVE-range), ее можно характеризовать следующими показателями: значением деформации γ_L , модулем накопления G'_L и напряжения сдвига τ_L . Переходная фаза 2 или фаза пластичных необратимых деформаций представляет собой область от начала снижения кривых модулей накопления G' и потерь G'' до достижения их пересечения в точке Crossover (flow point). Наблюдающиеся в этой зоне деформации являются необратимыми, но полного разрушения микроструктуры еще не происходит.

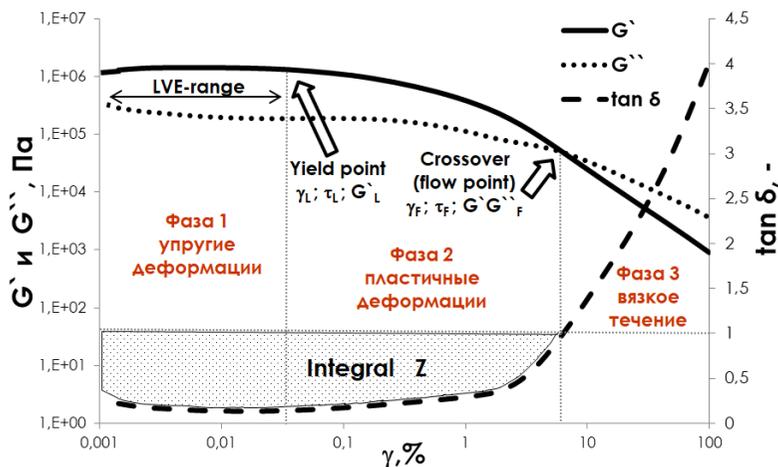


Рис. 2. Кривые модулей накопления G' и потерь G'' , фактора потерь $\tan \delta$ в осцилляционном амплитудном тесте: диапазон линейной вязкоупругости, фазы пластичных деформаций и вязкого течения, интегральная зона Z.

Fig. 2. Curves of storage G' and loss G'' moduli, damping factor $\tan \delta$ in the oscillatory amplitude sweep test (the linear viscoelastic range, phases of plastic deformation and viscous flow, Integral Z).

Фаза 3 представляет собой область “вязкого течения” после перехода через точку Crossover, область разрушения структуры. Протяженность фаз 2 и 3 можно охарактеризовать показателями в точке Crossover: значением деформации γ_F , модулем накопления и потерь (G' , G''_F) и напряжения сдвига τ_F . Интегральная зона (Integral Z) представляет собой комплексный показатель, описывающий фазы упругих и пластичных деформаций.

Для статистического анализа полученных реологических показателей использовались программы Microsoft Excel и Statistica. Ввиду большого количества выборок значений реологических показателей в генетических горизонтах изучаемых почв и небольшого количества повторностей измерения были применены методы непараметрической статистики: расчет медианных значений и тест Краскела – Уоллиса для проверки гипотезы о равенстве медиан нескольких независимых выборок. Также проведен кластерный анализ (расчет Евклидовых расстояний по правилу объединения с минимизацией дисперсий по методу Уорда) взаимосвязей значений реологических показателей и физических и химических свойств почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Физические и химические свойства почв

На рисунках 3 и 4 представлены физические и химические свойства изучаемых типов почв. Дерново-подзолистая и агродерново-подзолистая почва (рис. 3а, 3б) являются тяжелосуглинстыми крупнопылеватыми (текстурный класс USDA – silt) и характеризуется элювиально-иллювиальным распределением фракций физической глины (<0.01 мм) и ила (<0.001 мм), менее выраженным в агродерново-подзолистой почве, и полуторных оксидов по профилям; невысоким содержанием обменных катионов и общего углерода в гумусовом и пахотном горизонте с резким снижением его значений по глубине; кислой реакцией по профилю, при этом близкие к нейтральным значения кислотности в верхних горизонтах пахотной почвы являются следствием остаточного содержания кальция и магния, связанного с известкованием почвы в прошлом.

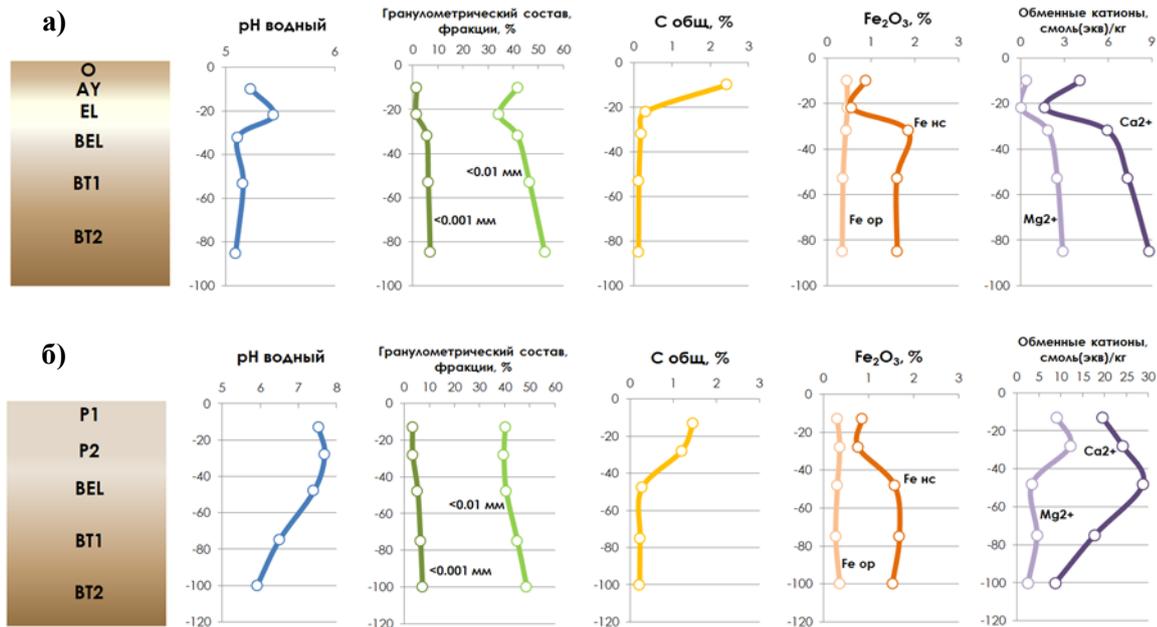


Рис. 3. Некоторые свойства **а)** дерново-подзолистой и **б)** агродерново-подзолистой почвы (Fe op – железо оксалатрастворимое, Fe нс – несиликатное).

Fig. 3. Some properties of the **a)** soddy-podzolic and **б)** agrosoddy-podzolic soils (Fe op: Fe content according to Tamm, Fe нс: Fe content according to Mehra and Jackson).

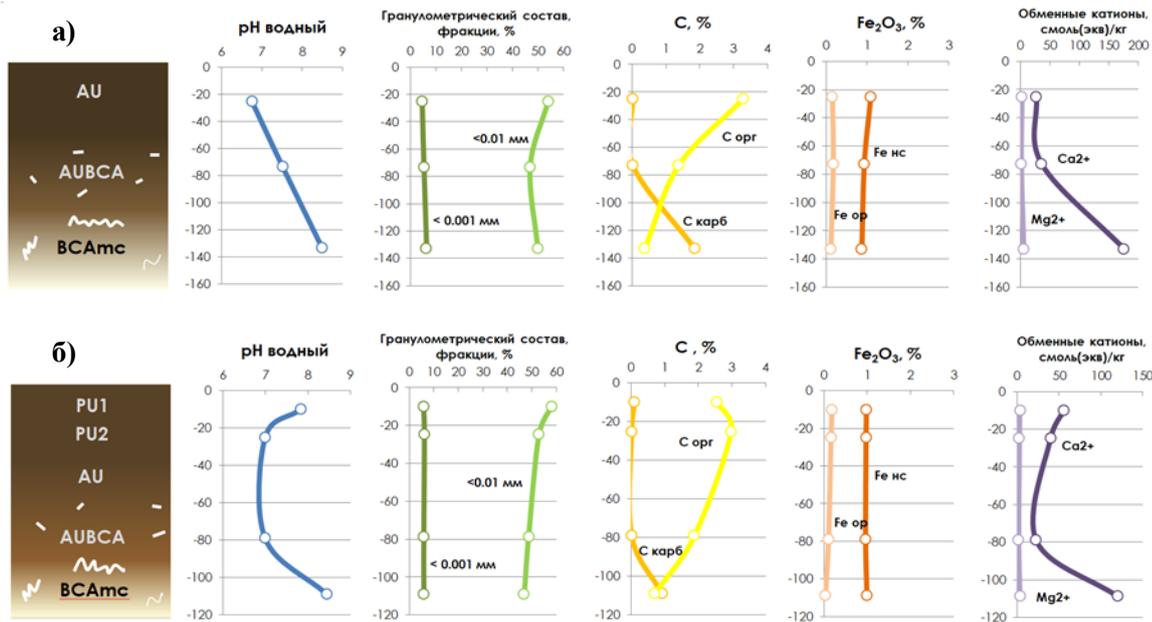


Рис. 4. Некоторые свойства **а)** чернозема миграционно-мицеллярного и **б)** агрочернозема миграционно-мицеллярного (Fe оп – железо оксалатрастворимое, Fe нс – несиликатное).
Fig. 4. Some properties of **а)** chernozem and **б)** agrochernozem (Fe оп: Fe content according to Tamm, Fe нс: Fe content according to Mehra and Jackson).

Чернозем миграционно-мицеллярный и агрочернозем миграционно-мицеллярный относятся к тяжелым суглинкам крупнопылеватым (текстурный класс USDA – silt loam) и характеризуются слабой дифференциацией содержания фракций физической глины и отсутствием дифференциации фракции ила и полуторных оксидов (рис. 4а, 4б). Реакция среды нейтральная, в карбонатных горизонтах – слабощелочная, обменного кальция содержится значительно больше магния. Содержание органического углерода равномерно снижается с глубиной, отмечается неглубокое вымывание карбонатов.

В таблице 1 представлены результаты определения плотности и влажности изучаемых почв во время реологического испытания. Для дерново-подзолистых почв наблюдается увеличение значений плотности с глубиной горизонтов отбора, при этом плотность пахотного горизонта P1 больше плотности серогумусового горизонта АУ почвы под ельником. Для чернозема миграционно-мицеллярного также характерно увеличение значений плотности с глубиной, в агрочерноземе миграционно-мицеллярном максимальные значения плотности отмечались в пахотных горизонтах PU1 и PU2.

Значения влажности в образцах дерново-подзолистых почв максимальны в серогумусовом горизонте АУ и пахотном горизонте P1, при этом для нижележащих горизонтов пахотной почвы дифференциация значений не столь очевидна. Для чернозема миграционно-мицеллярного и агрочернозема миграционно-мицеллярного не было отмечено четкого распределения влажности по глубине.

2. Реологические показатели почв

Реологические показатели можно разделить на показатели упругости и сдвиговой устойчивости. К показателям вязкоупругости почв относятся диапазон линейной вязкоупругости (LVE-range), определяемый значением деформации γ_L и модулем накопления G'_L , диапазон пластичных деформаций, заканчивающийся точкой Crossover (flow point), определяемый деформацией γ_F и значением модулей накопления и потерь (G' и G''_F), интегральная зона – Integral Z.

Таблица 1. Плотность и влажность изучаемых образцов дерново-подзолистых почв и черноземов типичных во время реологического испытания

Table 1. Bulk density and water content of the studied samples of soddy-podzolic soils and typical chernozems during the rheological test

| Почва, горизонт | Глубина, см | Влажность, % | Плотность, г/см ³ |
|---------------------------------------------|-------------|--------------|------------------------------|
| <i>Дерново-подзолистая почва</i> | | | |
| AУ | 4–15 | 51.6 | 0.55 |
| EL | 15–28 | 26.4 | 1.36 |
| BEL | 28–35 | 24 | 1.44 |
| BT1 | 35–70 | 22.7 | 1.49 |
| BT2 | 70–100 | 22.7 | 1.53 |
| <i>Агродерново-подзолистая почва</i> | | | |
| P1 | 0–26 | 31.3 | 1.33 |
| P2 | 26–30 | 27.4 | нет данных |
| BEL | 30–65 | 23.5 | 1.57 |
| BT1 | 65–85 | 33.4 | 1.57 |
| BT2 | 85–115 | 24.0 | нет данных |
| <i>Чернозем миграционно-мицеллярный</i> | | | |
| AU | 0–50 | 40.5 | 1.09 |
| AUBCA | 50–95 | 43.6 | 1.23 |
| BCAmc | 95–170 | 34 | 1.41 |
| <i>Агрочернозем миграционно-мицеллярный</i> | | | |
| PU1 | 0–20 | 35.8 | 1.32 |
| PU2 | 20–30 | 30.4 | 1.34 |
| AUBCA | 60–97 | 41.8 | 1.06 |
| BCAmc | 97–120 | 43.1 | нет данных |

Напряжения сдвига τ_L и τ_F (для диапазона LVE-range и в точке Crossover соответственно) и τ_{max} относятся к показателям сдвиговой устойчивости почв (Holthusen et al., 2019).

Ввиду большого количества получаемых в осцилляционном тесте данных и корреляций реологических показателей между собой (Périte et al., 2016) в данной статье рассматривались следующие показатели: напряжения сдвига τ_L , τ_F , τ_{max} и деформация γ_L , интегральная зона – integral Z.

2.1 Диапазон линейной вязкоупругости LVE-range

Первым этапом в нашем анализе реологического поведения почв было изучение диапазона линейной вязкоупругости LVE-range (рис. 5)¹. Показатель γ_L физически представляет собой расстояние полностью обратимого бокового смещения слоев частиц во время колебания верхнего плато реометра. Считается, что при деформациях внутри диапазона LVE-range электростатических сил, действующих между частицами, достаточно для перемещения их в исходное положение, поэтому данная область представляет собой меру упругого поведения почвы ([Holthusen et al., 2019](#); [Mezger, 2014](#)).

Оценка значимости различий показала значимую разницу при $p < 0.05$ для пар значений ДП АУ – ДП EL, ДП АУ – ДП BEL, ДП АУ – АДП BEL, ДП АУ – Ч ВСАмс, ДП EL – Ч АУ, ДП EL – Ч АУВСА, ДП EL – АЧ PU1, ДП EL – АЧ PU2, ДП BEL – АЧ PU1, ДП BEL – АЧ PU2. В дерново-подзолистой почве наблюдается элювиально-иллювиальная дифференциация значений γ_L по глубине с наибольшими медианными значениями показателя в серогумусовом горизонте АУ (0.007%) и наименьшими (0.002%) – в элювиальном горизонте EL (рис. 5а). Ожидалось, что в агродерново-подзолистой почве отличия будут менее выраженными, по сравнению с дерново-подзолистой почвой под ельником, тест Краскела – Уоллиса также не показал значимых отличий. Однако отметим, что медианные значения показателя в пахотном горизонте P1 несколько выше, чем в нижележащих. Для черноземов миграционно-мицеллярных не было выявлено значимых отличий между горизонтами двух профилей, но замечено, что в целом медианные значения деформации γ_L темногумусового АУ и пахотных горизонтов PU1 и PU2 несколько выше, чем нижележащих карбонатных горизонтов ВСАмс. Гумусовые и пахотные горизонты дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных не показали четко выраженных отличий.

¹ Результаты определения деформации γ_L , характеризующей диапазон линейной вязкоупругости почв, взяты из работы [Клюевой, Хайдаповой, 2017](#).

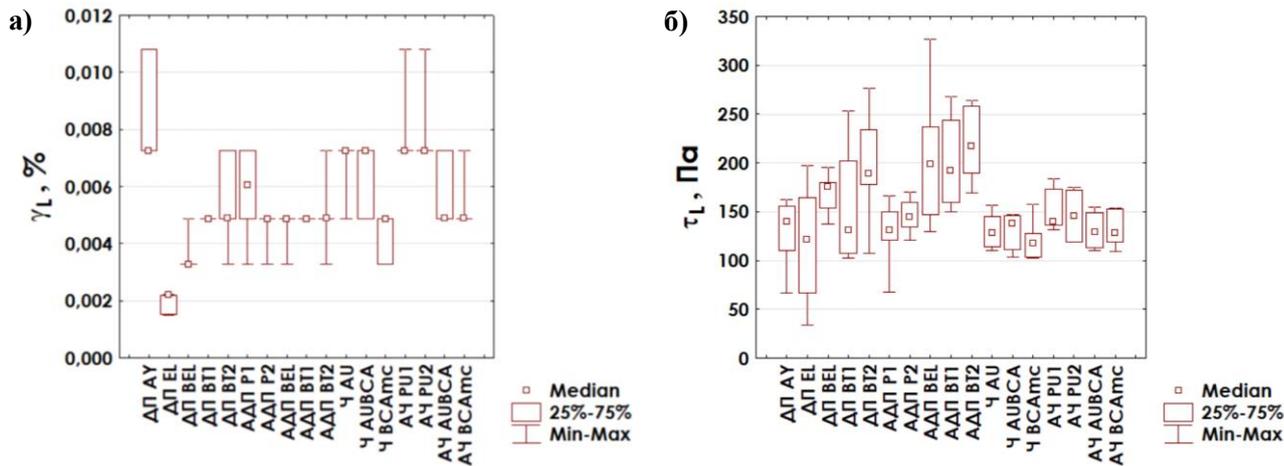


Рис. 5. Диапазон линейной вязкоупругости LVE-range: **а)** – деформация γ_L , **б)** – напряжение сдвига τ_L в конце диапазона LVE-range дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистые почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные, $n = 4-7$, min-max – размах значений величин, 25%–75% – нижний и верхний квартили).

Fig. 5. The linear viscoelastic range (LVE-range): **a)** – deformation γ_L , **b)** – shear stress τ_L at the end of the LVE-range of the investigated soils (ДП and АДП – soddy-podzolic and agrosoddy-podzolic soils, Ч and АЧ – chernozem and agrochernozem, $n = 4-7$, min-max – the value ranges, 25%–75% – the lower and upper quartiles).

Напряжение сдвига τ (shear stress, shear resistance) представляет собой устойчивость почвы к некоторой внешней сдвиговой нагрузке. Анализ значимости различий напряжения сдвига τ_L в конце диапазона упругих деформаций LVE-range тестом Краскела – Уоллиса выявил лишь одну пару значений: АДП ВТ2 – Ч ВСАмс (рис. 5б). Данный факт, возможно, связан с большим разбросом данных в дерново-подзолистых почвах и фактической слабостью дифференциацией показателя для изучаемых черноземов из-за мощного гумусового профиля и нечетких отличий в гранулометрическом составе. Однако необходимо сказать, что в дерново-подзолистых почвах наблюдается тенденция к увеличению медианных значений данного показателя с глубиной. В целом размах значений в дерново-подзолистых почвах гораздо больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Данные кластерного анализа показали, что распределения величины γ_L в изучаемых почвах объясняются в основной степени содержанием органического вещества и физической глины, а также в случае дерново-подзолистых почв – влаги, черноземов миграционно-мицеллярных – железа (рис. 6а, 6б). Так, максимальные значения (статистически подтвержденные или имеющие тенденцию к увеличению показателя) деформации γ_L в изучаемых почвах отмечаются в гумусовых и пахотных горизонтах.

В случае напряжения сдвига τ_L (рис. 7а, 7б) основными определяющими факторами оказались содержания железа, физической глины и кальция для дерново-подзолистых почв, что проявилось в тенденции к увеличению показателя в их иллювиальных горизонтах ВТ1 и ВТ2, а для черноземов миграционно-мицеллярных – органического углерода, физической глины и железа.

Органическое вещество, катионы кальция, железа, тонкие фракции гранулометрического состава усиливают взаимодействие между почвенными частицами благодаря увеличению контактов между ними, приводя к увеличению доли упругой деформации.

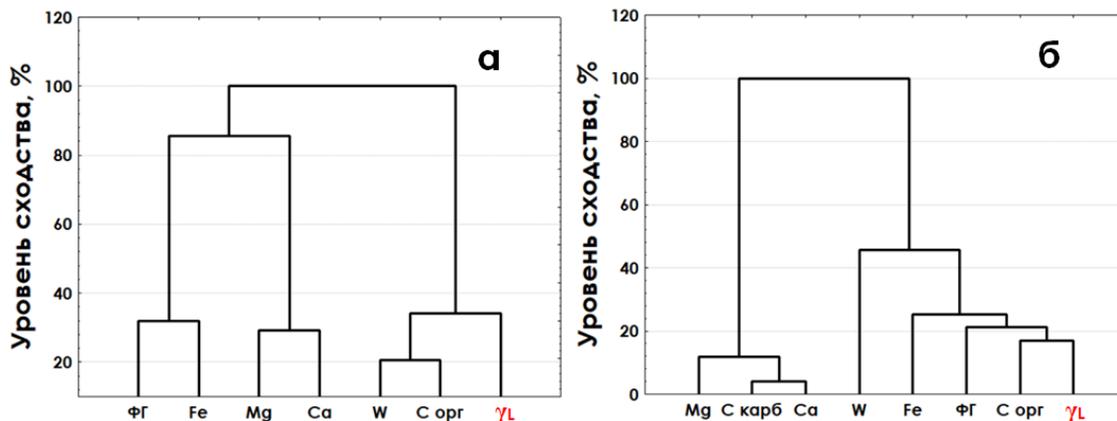


Рис. 6. Дендрограммы физических и химических свойств и деформации γ_L диапазона линейной вязкоупругости: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ΦГ, C карб, C орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 6. Tree diagrams for physical and chemical properties and deformation γ_L of the LVE-range: **a)** – soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ΦГ, C карб, C орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra–Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

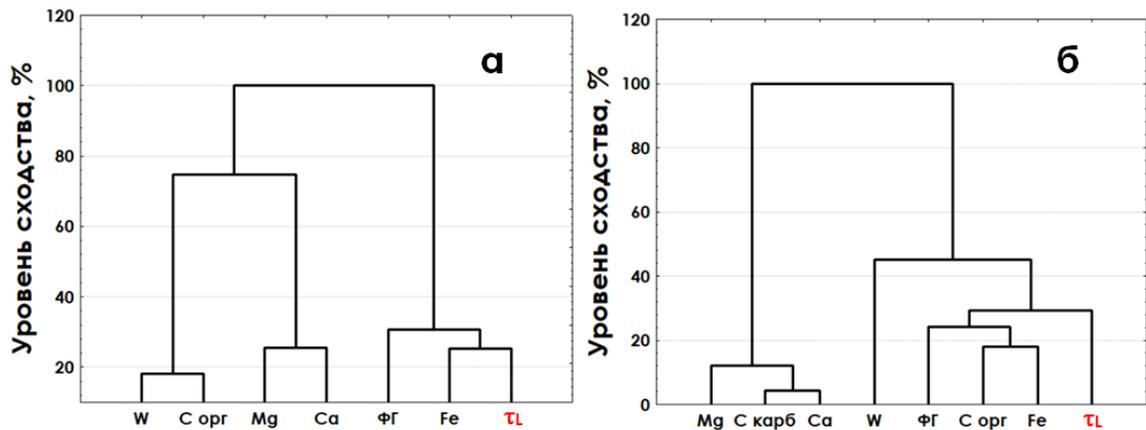


Рис. 7. Дендрограммы физических и химических свойств и напряжения сдвига τ_L в конце диапазона линейной вязкоупругости: **а**) – дерново-подзолистых почв, **б**) – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб, C орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 7. Tree diagrams for physical and chemical properties and shear stress τ_L at the end of the LVE-range: **a**) – soddy-podzolic soils, **б**) – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб, C орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

Органическое вещество повышает устойчивость почвы путем усиления когезии и увеличения числа менисков в ненасыщенных условиях ([Buchmann et al., 2015](#); [Markgraf et al., 2012](#); [Markgraf, Horn, 2007](#); [Zhang, Hartge, 1990](#)); частицы тонких фракций почвы выступают в качестве связующего агента между более крупными частицами ([Mitchell, Soga, 2005](#)). Кальций и магний усиливают микроагрегацию благодаря адсорбции на частицах с образованием мостиков, связывающих их между собой или с органическими коллоидами ([Bronick, Lal, 2005](#); [Lal, Shukla, 2004](#); [Encyclopedia of agrophysics, 2011](#)). Железо может уменьшать отталкивающие силы между отрицательно заряженными частицами ([Six et al., 2004](#)) и действовать как катионный мостик с образованием металлорганических соединений и гелей ([Bronick, Lal, 2005](#)).

2.2. Максимальное значение напряжения сдвига τ_{\max}

При деформациях, превышающих диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, продолжающееся движение почвенных частиц приводит к их зацеплению друг за друга, проникновению в соседние слои частиц. Благодаря этому повышается число контактов, что приводит к увеличению значений напряжения сдвига вплоть до некоторого плато или максимального пикового значения τ_{\max} ([Holthusen et al., 2019](#)).

Изученные ненарушенные дерново-подзолистые, агродерново-подзолистые, черноземы миграционно-мицеллярные и агрочерноземы миграционно-мицеллярные проявляют подобный характер вязкоупругого поведения при нагрузке (при данном уровне увлажнения): все образцы проявляют отчетливый пик на кривой напряжения сдвига $\tau(\gamma)$ (рис. 1), что соответствует типу хрупкого разрушения структуры ([Holthusen et al., 2017](#); [Horn et al., 2019](#)). Данный пик, или τ_{\max} , при этом характеризует максимальную устойчивость или прочность микроструктуры, проявляемую почвой в осцилляционном тесте амплитудной развертки. Оценка значимости различий методом Краскела – Уолисса показала достоверную разницу при $p < 0.05$ для пар значений: ДП АУ – Ч АУВСА, ДП АУ – АЧ ВСАмс, ДП ВТ2 – Ч АУВСА, ДП ВТ2 – АЧ ВСАмс, АДП ВЕЛ – Ч АУВСА, АДП ВЕЛ – АЧ ВСАмс, АДП ВТ1 – Ч АУ, АДП ВТ1 – Ч АУВСА, АДП ВТ1 – АЧ ВСАмс, АДП

ВТ2 – Ч АУВСА.

Отметим, что наблюдается тенденция (рис. 8) к элювиально-иллювиальной дифференциации максимального напряжения сдвига τ_{\max} в дерново-подзолистой почве и к увеличению медианных значений τ_{\max} с глубиной в агродерново-подзолистой почве.

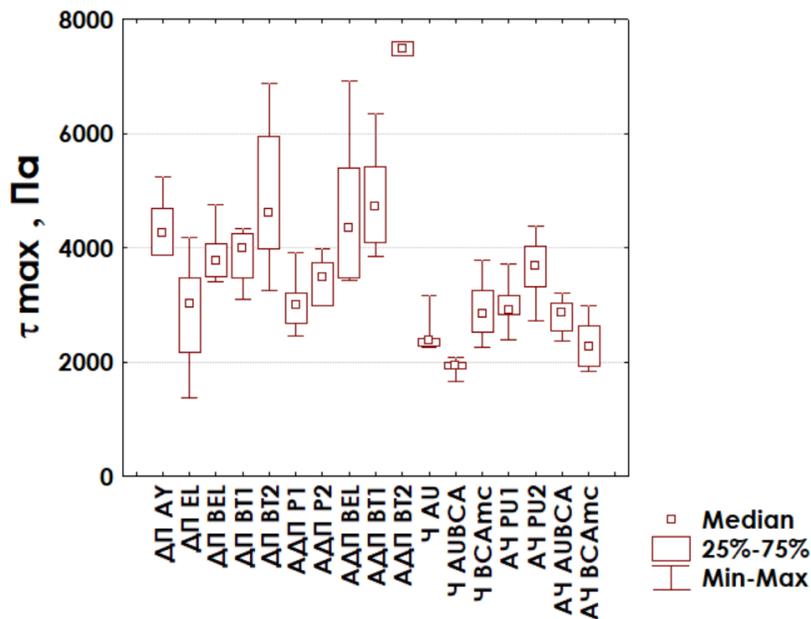


Рис. 8. Максимальное значение напряжения сдвига τ_{\max} дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистые почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные, $n = 4-7$, min-max – размах значений величин, 25%–75% – нижний и верхний квартили).

Fig. 8. Maximal shear stress τ_{\max} of the investigated soils (ДП and АДП – soddy-podzolic and agrosoddy-podzolic soils, Ч and АЧ – chernozem and agrochernozem, $n = 4-7$, min-max – the value ranges, 25%–75% – the lower and upper quartiles).

В темногомусовом горизонте АU чернозема под дубрашиной максимальное напряжение сдвига значительно больше, чем в нижележащем АUBСА, в агрочерноземе миграционно-мицеллярном можно отметить тенденцию к уменьшению значения показателя с глубиной (статистически не подтверждена). Нижние горизонты профилей дерново-подзолистых почв характеризуются большими значениями максимального напряжения сдвига по сравнению с нижними горизонтами черноземов миграционно-мицеллярных, гумусовые и пахотные горизонты изучаемых почв не показали четко выраженных отличий. Так же, как и в случае с напряжением сдвига τ_L в конце диапазона упругих деформаций LVE-range, размах значений τ_{max} в дерново-подзолистых почвах гораздо больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Кластерный анализ данных (рис. 9а, 9б) показал, что факторами, оказывающими наибольшее воздействие на максимальное напряжение сдвига в дерново-подзолистых почвах, являются содержания физической глины, железа и кальция, а в черноземах миграционно-мицеллярных – содержания физической глины, органического вещества и магния, что и определило распределение значений показателя в профилях почв. Механизмы действия этих структурирующих агентов кратко были описаны выше. При рассмотрении максимального значения напряжения сдвига τ_{max} можно наблюдать другой фактор, воздействующий на увеличение числа контактов между почвенными частицами: начальную плотность образца (Terzaghi et al., 1996; Ye et al., 2016). В данном случае влияние плотности образца (табл. 1) проявилось более четко, чем в случае с диапазоном LVE-range: максимальные значения (статистически подтвержденные или тенденции к увеличению) отмечались в иллювиальных горизонтах ВТ1 и ВТ2 дерново-подзолистых почв и PU2 агрочернозема миграционно-мицеллярного, для которых были характерны наибольшие значения плотности.

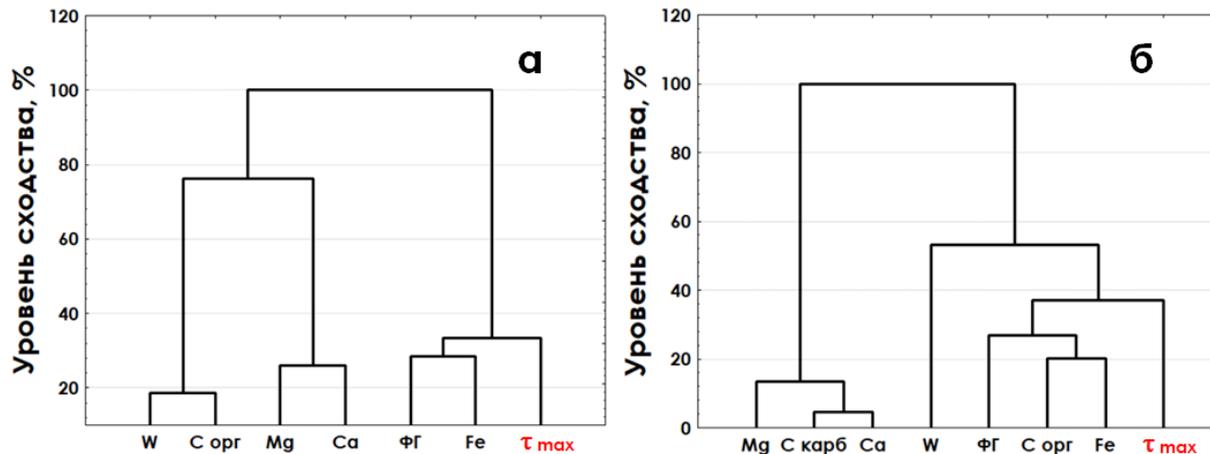


Рис. 9. Дендрограммы физических и химических свойств и максимального напряжения сдвига τ_{\max} : **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно–мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб, C орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 9. Tree diagrams for physical and chemical properties and maximal shear stress τ_{\max} : **а)** – soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб, C орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

2.3 Точка Crossover (flow point) – переход из области пластичного в область вязкого поведения и Интегральная зона Integral Z

После достижения максимального значения напряжения сдвига τ_{\max} , при котором частицы различной формы становятся параллельно выровненными относительно друг друга, трение между частицами уменьшается вследствие разрушения микроструктуры или последующей перегруппировки частиц ([Holthusen et al., 2019](#)).

Значение напряжения сдвига τ_F в точке Crossover соответствует той величине напряжения сдвига, при которой модули накопления G' и потерь G'' имеют одинаковые величины, то есть накопленная упругая энергия становится количественно равной рассеянной энергии. После достижения данной точки в осцилляционном тесте микроструктура почвы неовозвратно разрушается (microstructural collapse).

Оценка значимости различий показала значимую разницу при $p < 0.05$ для пар значений: ДП АУ – ДП EL, ДП АУ – Ч АUBCA, ДП АУ – АЧ BCАmc, ДП EL – АДП BT1, ДП EL – АДП BT2, ДП BT2 – Ч АUBCA, АДП BEL – Ч АUBCA, АДП BT1 – Ч АUBCA, АДП BT1 – АЧ BCАmc, АДП BT2 – Ч AU, АДП BT2 – Ч АUBCA, АДП BT2 – Ч BCАmc, АДП BT2 – АЧ АUBCA, АДП BT2 – АЧ BCАmc.

Распределения величины напряжения сдвига τ_F похожи с распределением пикового значением τ_{\max} (рис. 10а). В дерново-подзолистой почве наблюдается элювиально-иллювиальная дифференциация значений напряжения сдвига τ_F по глубине с наибольшими медианными значениями показателя в серогумусовом горизонте АУ (4 090 Па) и иллювиальном BT2 и наименьшими (2 050 Па) – в элювиальном горизонте EL. Тест Краскела – Уоллиса не показал значимых отличий для агродерново-подзолистой почвы, однако отметим, что для нее проявляется отчетливая тенденция к увеличению медианных значений показателя с глубиной.

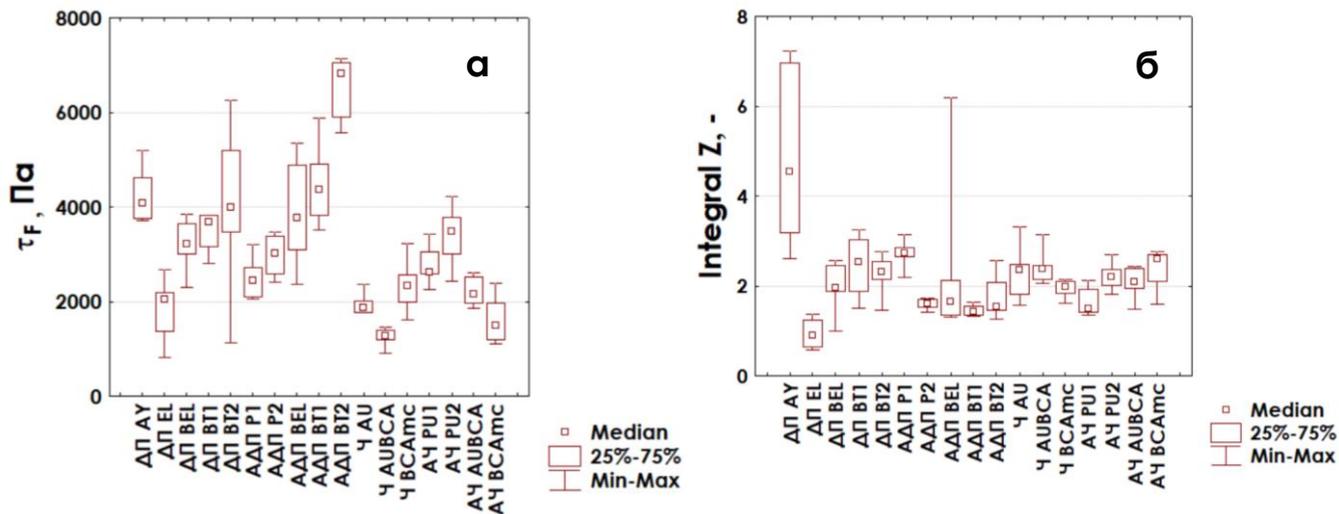


Рис. 10. а) – напряжение сдвига τ_F в точке Crossover, **б)** – интегральная зона Integral Z дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных (ДП и АДП – дерново-подзолистая и агродерново-подзолистые почвы, Ч и АЧ – чернозем и агрочернозем миграционно-мицеллярные, n = 4–7, min-max – размах значений величин, 25%–75% – нижний и верхний квантили).

Fig. 10. а) – shear stress τ_F in Crossover point, **б)** – Integral Z of the investigated soils (ДП and АДП – soddy-podzolic and agrosoddy-podzolic soils, Ч and АЧ – chernozem and agrochernozem, n = 4–7, min-max – the value ranges, 25%–75% – the lower and upper quartiles).

Для черноземов миграционно-мицеллярных не было выявлено значимых отличий между горизонтами двух профилей, но можно отметить, что в целом медианные значения напряжения сдвига τ_F пахотных горизонтов PU1 и PU2 несколько выше, чем в нижележащем горизонте BCAmc.

Нижние горизонты профиля агродерново-подзолистой почвы BT2 характеризуются большими значениями максимального напряжения сдвига по сравнению с нижними горизонтами AUBCA и BCAmc черноземов миграционно-мицеллярных (при значимых отличиях).

Гумусовые и пахотные горизонты изучаемых почв не показали четко выраженных отличий.

Как и в случаях с напряжением сдвига τ_L в конце диапазона упругих деформаций LVE-range τ_F размах значений в дерново-подзолистых почвах гораздо больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Кластерный анализ данных показал, что факторами, оказывающими наибольшее воздействие на изменение напряжения сдвига τ_F , стали содержания физической глины, железа и влаги в случае дерново-подзолистых почв; и физической глины, органического вещества и магния в случае черноземов миграционно-мицеллярных (рис. 11а, 11б). Это проявилось в максимальных значениях показателя в иллювиальных горизонтах BT2 дерново-подзолистых почв и пахотных горизонтах PU1 и PU2 черноземов миграционно-мицеллярных. Отметим, что содержание физической глины, т. е. количество почвенных частиц тонких фракций, и сопутствующий фактор плотности почвы имеют первостепенное значение для напряжения сдвига τ_F в точке Crossover и пикового значения τ_{max} во всех изучаемых почвах (механизмы влияния были описаны в разделе 2.2. и 2.3). В данной статье не рассмотрено влияние формы частиц на протекание сдвиговых процессов, однако данный вопрос важен и требует более глубокого и детального изучения в будущем ([Abbireddy, Clayton, 2015](#); [Kock, Huhn, 2007](#)).

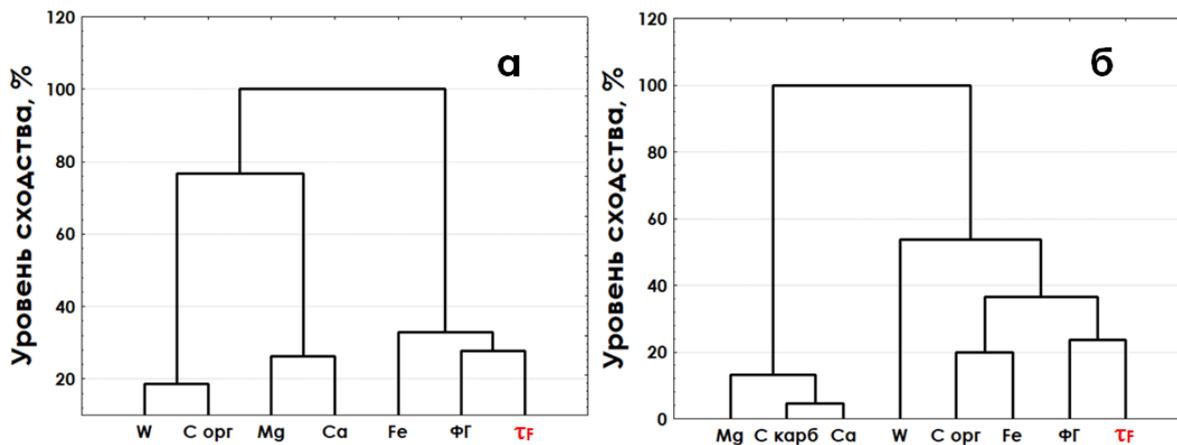


Рис. 11. Дендрограммы физических и химических свойств и напряжения сдвига τ_F в точке Crossover: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб, C орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 11. Tree diagrams for physical and chemical properties and shear stress τ_F in Crossover point: **а)** –soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб., C орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

Дополнительным расчетным показателем, описывающим характер перехода поведения почвы из диапазона упругих деформаций в состояние вязкого течения или полного разрушения структуры, является индекс перехода (flow transition index), равный отношению напряжений сдвига в точке Crossover и в конце диапазона LVE-range – τ_F/τ_L (рис. 12). Чем ближе данное соотношение к единице, тем больше проявляется тенденция поведения почвенного образца к хрупкому разрушению ([Mezger, 2014](#)).

Напряжение сдвига τ_F в точке Crossover превышает напряжение сдвига τ_L в точке yield point, определяющей диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, в 9–31 раз в изученных почвах. Меньшую тенденцию к хрупкому разрушению проявляют либо гумусовые (в т. ч. пахотные) горизонты, либо горизонт BT2 в случае агродерново-подзолистой почвы, что подтверждает представленные выше результаты распределения значений напряжения сдвига τ_L и τ_F в профилях почв.

Интегральная зона Z (integral Z) рассчитывается как площадь фигуры, ограниченной кривой $\tan\delta$ и прямой $y = G''/G' = 1$ (рис. 2). Данный показатель представляет собой сумму площадей диапазонов упругих и пластичных деформаций, то есть характеризует общую устойчивость микроструктуры к нагрузкам (structural stiffness).

Оценка значимости различий показала значимую разницу при $p < 0.05$ для пар значений: ДП AY – ДП EL, ДП AY – АДП P2, ДП AY – АДП BEL, ДП AY – АДП BT1, ДП AY – АЧ PU1, ДП EL – АДП P1, ДП EL – Ч AUBCA, ДП EL – АЧ BCAmc, АДП P1 – АДП BT1.

Максимальная интегральная зона Z (4.5) отмечалась для серо-гумусового горизонта AY дерново-подзолистой почвы, минимальная (0.9) – для элювиального горизонта (рис. 10б). В агродерново-подзолистой почве значения показателя в пахотном горизонте P1 значимо больше нижележащего текстурного горизонта BT2, для горизонта BEL характерен наибольший разброс значений.

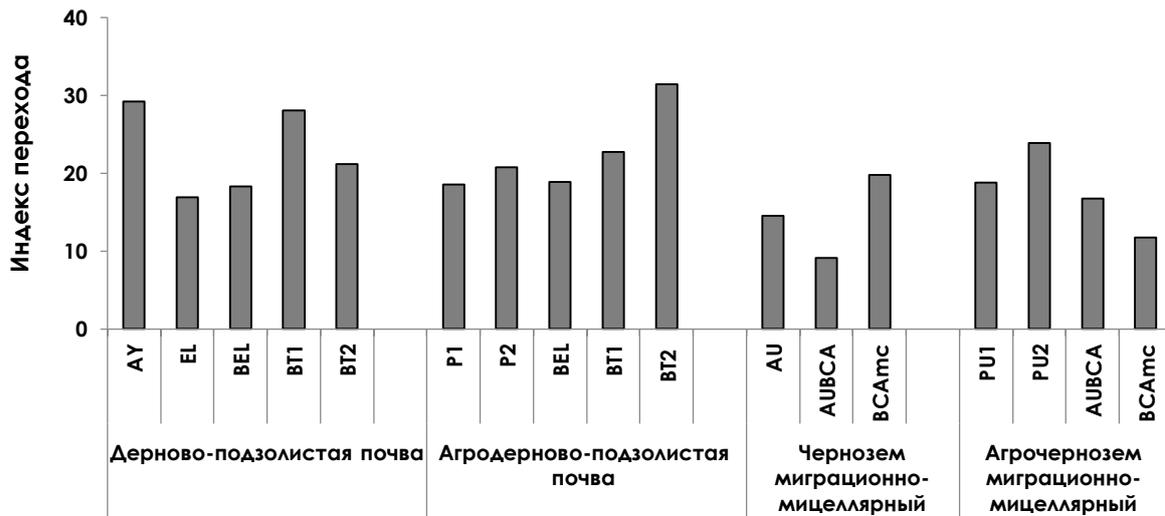


Рис. 12. Индекс перехода (flow transition index) для изученных дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных.

Fig. 12. The flow transition index of the investigated soils.

Для черноземов миграционно-мицеллярных не было выявлено значимых отличий между горизонтами двух профилей, что, возможно, связано с меньшей дифференциацией физических и химических свойств в профилях, а также комплексным характером расчета показателя. Размах значений показателя в дерново-подзолистых почвах несколько больше, чем в черноземах миграционно-мицеллярных.

Интегральная зона серогумусового горизонта АУ значимо больше пахотного горизонта Р2 агродерново-подзолистой почвы и РU1 агрочернозема миграционно-мицеллярного. В целом при данном объеме выборки остальные горизонты изученных почв не показывают значимых отличий по величине интегральной зоны Z.

Кластерный анализ показал, что факторами, оказывающими наибольшее воздействие на изменение показателя в дерново-подзолистых почвах, являются органическое вещество, содержание влаги и физическая глина (рис. 13а), что аналогично зависимостям, полученным для деформации γ_L диапазона линейной вязкоупругости. Для черноземов миграционно-мицеллярных содержание влаги, железа и кальция оказались главными влияющими факторами (рис. 13б). Предполагалось, что зависимости, полученные для интегральной зоны Z черноземов, будут, как и в дерново-подзолистых почвах, схожи с зависимостями, выявленными для деформации γ_L его диапазона линейной вязкоупругости, однако кластерный анализ это не подтвердил. Данный факт, вероятно, сможет подтвердиться или опровергнуться при увеличении количества повторностей измерения в последующих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененный в исследовании метод осцилляционной амплитудной развертки открывает обширные возможности в быстром и информативном изучении и получении новых данных о реологическом поведении почв естественного сложения, что особенно важно для точного прогноза их устойчивости к воздействию сельскохозяйственной техники и деградационных рисков.

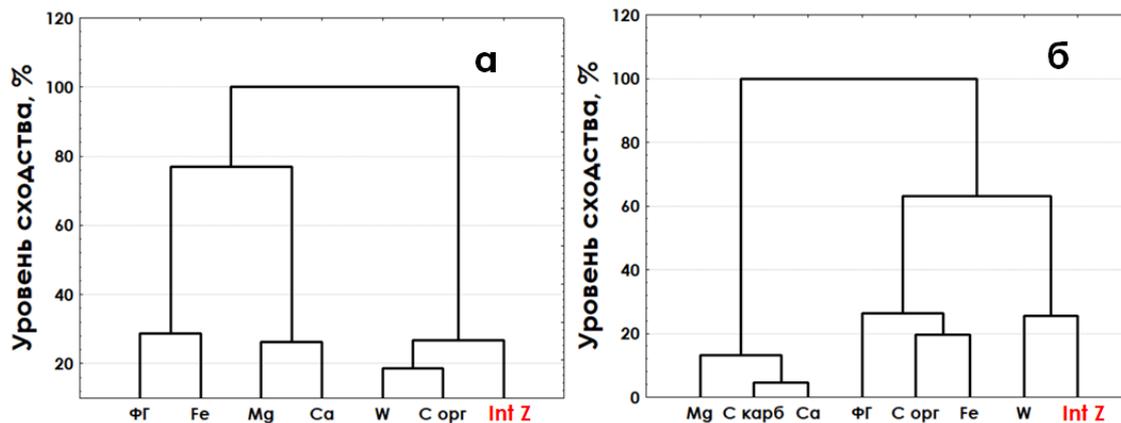


Рис. 13. Дендрограммы физических и химических свойств и интегральной зоны: **а)** – дерново-подзолистых почв, **б)** – черноземов миграционно-мицеллярных (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб, C орг – содержания обменных магния и кальция, влаги, несиликатного железа, фракции физической глины, неорганического и органического углерода).

Fig. 13. Tree diagrams for physical and chemical properties and Integral Z: **a)** – soddy-podzolic soils, **б)** – chernozems (Mg, Ca, W, Fe, ФГ, C карб, C орг – contents of exchangeable Mg, Ca, water, Fe (acc. Mehra – Jackson), physical clay (<0.01 mm), inorganic and organic carbon).

Все изученные почвы показали хрупкий тип разрушения микроструктуры с отчетливым пиком значений напряжения сдвига на реологической кривой, определяющим их максимальную устойчивость.

Резкая дифференциация значений физических и химических показателей в дерново-подзолистых почвах и их плавное изменение в черноземах миграционно-мицеллярных при небольшом количестве повторностей измерения нашли отражение в большем размахе значений реологических показателей для первых при используемых статистических методах.

Содержание органического углерода и физической глины являются одними из основных факторов, определяющих реологические показатели вязкоупругости изученных дерново-подзолистых почв и черноземов миграционно-мицеллярных: они положительно связаны с диапазоном линейной вязкоупругости LVE-range и интегральной зоной Z как суммы областей упругого и пластичного поведения. Показатели напряжения сдвига изученных почв (τ_L , τ_F , τ_{max}) в наибольшей степени связаны с изменением содержания физической глины, а также железа для дерново-подзолистых почв и органического углерода в случае черноземов миграционно-мицеллярных: с их увеличением повышается сдвиговая устойчивость.

Процессы, произошедшие в исследованных почвах в результате их сельскохозяйственного использования (распашки), привели к закономерному изменению изучаемых реологических показателей. Снижение содержания органического углерода приводит к уменьшению вязкоупругости и сдвиговой устойчивости почв, помимо этого повышенная плотность пахотных горизонтов и перераспределение физической глины проявляются в слабой дифференциации значений реологических показателей по глубине при наблюдающемся максимуме в верхнем горизонте.

В нашем исследовании параметры сдвиговой устойчивости изученных почв: напряжения сдвига в конце диапазона линейной вязкоупругости LVE-range τ_L и τ_F в точке пересечения модулей накопления и потерь Crossover, а также максимальное значение τ_{max} оказались более информативны и показали выраженные отли-

чия между генетическими горизонтами изученных почв по сравнению с показателями вязкоупругости: деформацией γ_L , характеризующей область упругого поведения, и интегральной зоной Z. Однако для полного изучения реологического поведения почв и его изменения в результате воздействия природных и антропогенных факторов в других исследовательских работах необходим подробный анализ всех вышеперечисленных реологических параметров.

В настоящее время предложенные реологические показатели являются лишь небольшой долей от возможных индикаторов физического состояния почв, пригодных для научного изучения и практического применения. Представленный метод определения реологических параметров почвы с помощью реометрической техники пока занимает малую научную нишу в агрофизических исследованиях. Однако в будущем показатели сдвиговой устойчивости и вязкоупругости могут дать много новой и дополнительной информации о межчастичных связях, почвенной прочности, взаимосвязях между процессами на мезо- и макроуровнях, а полученные данные послужат существенным дополнением к уже имеющемуся блоку индикаторов для их использования в практических приложениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондарев А.Г.* Физика и механика почв в решении современных проблем почвенного плодородия // Почвоведение: аспекты, проблемы, решения. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2003. С. 553–563.
2. *Бондарев А.Г., Кузнецова И.В.* Проблема деградации физических свойств почв России и пути её решения // Почвоведение. 1999. №. 9. С. 1126–1131.
3. *Бондарев А.Г., Кузнецова И.В., Тихонравов П.И., Уткаева В.Ф.* Научные основы оптимизации физических условий плодородия почв и повышение их устойчивости к деградации // Современные проблемы почвоведения: Научные труды Почвенного института имени В.В. Докучаева. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2000. С. 408–422.
4. *Клюева В.В.* Реологические свойства почв и их связь с физическими и химическими свойствами на примере дерново-подзолистой почвы и

чернозема типичного: Дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2019. 142 с.

5. *Клюева В.В., Хайдапова Д.Д.* Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. № 89. С. 21–35. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-21-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35).

6. *Кузнецова И.В., Скворцова Е.Б.* Теоретические и методические основы предотвращения физической деградации почв // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии: Т. 1. Теоретические и методические основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий. Коллективная монография. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2013. С. 50–133.

7. *Сапожников П.М.* Деградация физических свойств почв при антропогенных воздействиях // Почвоведение. 1994. № 11. С. 60–66.

8. Теория и практика химического анализа почв. ред. Воробьева Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

9. *Фрид А.С., Кузнецова И.В., Королева И.Е., Бондарев А.Г., Козут Б.М., Уткаева В.Ф., Азовцева Н.А.* Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. М.: Почв. инт им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.

10. *Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шейн Е.В., Милановский Е.Ю.* Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963.

11. *Хитров Н.Б., Понизовский А.А.* Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв. М.: ВАСХНИЛ, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.

12. *Хитров Н.Б., Хайдапова Д.Д.* Вязкоупругое поведение вертикального солонца Каменной Степи // Почвоведение. 2019. № 7. С. 843–858.

13. *Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лаптева Е.М.* Реологические свойства северо-таежных автоморфных и полугидроморфных криометаморфических почв Европейского северо-востока России (Республика Коми) // Почвоведение. 2018. № 4. С. 439–450.

14. *Шейн Е.В.* Курс физики почв: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.

15. *Шейн Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Тюгай З., Початкова Т.Н., Дембовецкий А.В.* Практикум по физике

твердой фазы почв: Учебное пособие. М.: Буки Веди, 2017. 119 с.

16. *Abbireddy C.O.R., Clayton C.R.I.* The impact of particle form on the packing and shear behaviour of some granular materials: an experimental study // *Granular Matter*. 2015. Vol. 17. No. 4. P. 427–438.

17. *Armenise E., Redmile-Gordon M., Stellacci A.M., Ciccarese A., Rubino P.* Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment // *Soil Tillage Research*. 2013. Vol. 130. P. 91–98.

18. *Barré P., Hallett P.D.* Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy // *European Journal of Soil Science*. 2009. Vol. 60. P. 525–538.

19. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management: A review // *Geoderma*. 2005. Vol. 124. P. 3–22.

20. *Buchmann C., Bentz J., Schaumann G.E.* Intrinsic and model polymer hydrogel-induced soil structural stability of a silty sand soil as affected by soil moisture dynamics // *Soil Tillage Research*. 2015. Vol. 154. P. 22–33.

21. *Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., Deyn G.D., Goedy R.D., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Willem J., Groenigen V., Brussaard L.* Soil quality – A critical review // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. Vol. 120. P. 105–125.

22. *Dexter A.R.* Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth // *Geoderma*. 2004. Vol. 120. P. 201–214.

23. *Encyclopedia of agrophysics.* J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec (Eds). Dordrecht: Springer, 2011. 1028 p.

24. *Food security and soil quality.* R. Lal, B.A. Stewart (Eds). Boca Raton, USA: Taylor and Francis Group, 2010. 407 p.

25. *Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R.* Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses // *Geoderma*. 2017. Vol. 295. P. 129–141.

26. *Holthusen D., Pértile P., Reichert J. M., Horn R.* Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions // *Soil Tillage Research*. 2019. Vol. 191. P. 282–293.

27. *Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H.* Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? // *Soil Tillage Research*. 2019. Vol. 195.

28. *Kock I., Huhn K.* Influence of particle shape on the frictional strength of sediments – A numerical case study // *Sedimentary Geology*. 2007. Vol. 196.

No. 1–4. P. 217–233.

29. *Lal R., Shukla M.K.* Principles of soil physics. New York, Basel: Marcel Dekker, 2004. 682 p.

30. *Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R.* Influence of organic matter on rheological properties of soil // *Applied Clay Science*. 2012. Vol. 64. P. 25–33.

31. *Markgraf W., Horn R.* Rheological–stiffness analysis of K^+ -treated and $CaCO_3$ -rich soils // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2006. Vol. 169. P. 411–419.

32. *Markgraf W., Horn R.* Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils // *Soil Science Society of America Journal*. 2007. Vol. 71. No 3. P. 851–859.

33. *Markgraf W., Moreno F., Horn R.* Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques // *Vadose Zone Journal*. 2012. Vol. 11. P. 1–11.

34. *Mezger T.G.* The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers. Hanover: Vincentz Network. 2014. 4th edition. 434 p.

35. *Mitchell J.K., Soga K.* Fundamentals of soil behavior. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 3rd edition. 577 p.

36. *Périte P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A.* Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils // *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 2016. Vol. 40. P. 2–14.

37. *Périte P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M.* Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities // *Scientia Agricola*. 2018. Vol. 75. No 2. P. 154–162.

38. *Phogat V.K., Tomar V.S., Dahiya R.* Soil Physical Properties // *Soil Science: An Introduction*. Indian Society of Soil Science, 2016. First edition. P. 135–171.

39. *Reynolds D., Bowman B.T., Drury C.F., Tan C.S., Lu X.* Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters // *Geoderma*. 2002. Vol. 110. P. 131–146.

40. *Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Tan C.S.* Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions // *Geoderma*. 2008. Vol. 146. P. 466–474.

41. *Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., Yang, X.M.* Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physical quality // *Geoderma*. 2009. Vol. 152. P. 252–263.

42. *Schoenholtz S.H., Miegroet H., van Burger J.A.* A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities // *Forest and Ecology Management*. 2000. Vol. 138. P. 335–356.

43. Shukla M.K., Lal R., Ebinger M. Determining soil quality indicators by factor analysis // Soil Tillage Research. 2006. Vol. 87. P. 194–204.
44. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.A. history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil Tillage Research. 2004. Vol. 79. P. 7–31.
45. Stoppe N., Horn R. Microstructural strength of tidal soils – A rheometric approach to develop pedotransfer functions // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2018. Vol. 66. No. 1. P. 87–96.
46. Terzaghi K., Peck R.B., Nesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice. New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: John Wiley & Sons, 1996. 3rd edition. 417 p.
47. Ye C., Guo Z., Cai C., Wang J., Deng J. Effect of water content , bulk density , and aggregate size on mechanical characteristics of Aquults soil blocks and aggregates from subtropical China // Journal of Soils and Sediments. 2016. Vol. 17. No. 1. P. 210–219.
48. Zhang H.Q., Hartge K.H. Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter // Soil Technology. 1990. No. 3. P. 311–326.

REFERENCES

1. Bondarev A.G., Fizika i mekhanika pochv v reshenii sovremennykh problem pochvennogo plodorodiya (Soil physics and mechanics for solution modern problems of soil fertility), In: *Pochvovedenie: aspekty, problemy, resheniya* (Soil science: aspects, problems, solutions), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Rossel'khozakademii, 2003, pp. 553–563.
2. Bondarev A.G., Kuznetsova I.V., Problema degradatsii fizicheskikh svoystv pochv Rossiii i puti ee resheniya (The problem of degradation of physical properties of soils in Russia and solutions), *Pochvovedenie*, 1999, No. 9. pp. 1126–1131.
3. Bondarev A.G. Kuznetsova I.V., Tikhonravov P.I., Utkaeva V.F., Nauchnye osnovy optimizatsii fizicheskikh uslovii plodorodiya pochv i povyshenie ikh ustoychivosti k degradatsii (Scientific basis for optimizing of physical conditions of soil fertility and increasing their resistance to degradation), In: *Sovremennye problemy pochvovedeniya: Nauchnye trudy Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* (Modern problems of soil science: Scientific works of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Rossel'khozakademii, 2000, pp. 408–422.
4. Klyueva V.V., *Reologicheskie svoystva pochv i ikh svyaz' s fizicheskimi i khimicheskimi svoystvami na primere dernovo-podzolistoi pochvy i*

chernozema tipichnogo: Dis. ... kand. biol. nauk (Rheological properties of soddy-podzolic soils and typical chernozems and their relationships with physical and chemical properties. Cand. biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 2019, 142 p.

5. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Rheological properties of natural and disturbed structure samples of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, No. 89, pp. 21–35, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-21-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35).

6. Kuznetsova I.V., Skvortsova E.B., Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrashcheniya fizicheskoi degradatsii pochv (Theoretical and methodological basis of preventing of physical soil degradation), In: *Nauchnye osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossii i formirovaniya sistem vosproizvodstva ikh plodorodiya v adaptivno-landshaftnom zemledelii: Vol. 1. Teoreticheskie i metodicheskie osnovy predotvrashcheniya degradatsii pochv (zemel') sel'skokhozyaistvennykh ugodii. Kollektivnaya monografiya* (Scientific basis of preventing of soil (land) degradation of agricultural lands in Russia and formation of systems for the reproduction of their fertility in adaptive landscape agriculture: Vol. 1. Theoretical and methodological basis of preventing soils (lands) degradation of agricultural land. Collective monograph), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute Rossel'khozakademii, 2013. pp. 50–133.

7. Sapozhnikov P.M., Degradatsiya fizicheskikh svoystv pochv pri antropogennykh vozdeistviyakh (Degradation of physical properties of soils under anthropogenic influence), *Pochvovedenie*, 1994, No. 11, pp. 60–66.

8. Vorob'ev L.A. (Ed.), *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* (Theory and practice of chemical analysis of soils), Moscow: GEOS, 2006, 400 p.

9. Frid A.S., Kuznetsova I.V., Koroleva I.E., Bondarev A.G., Kogut B.M., Utkaeva V.F., Azovtseva N.A., *Zonal'no-provintsial'nye normativy izmenenii agrokhimicheskikh, fiziko-khimicheskikh i fizicheskikh pokazatelei osnovnykh pakhotnykh pochv evropeiskoi territorii Rossii pri antropogennykh vozdeistviyakh* (Zone standards of changes of agrochemical, physico-chemical and physical indicators of the main arable soils of the European territory of Russia under anthropogenic influences), Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2010, 176 p.

10. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Reologicheskie svoystva chernozemov tipichnykh (Kurskaya oblast') pri razlichnom zemlepol'zovanii (Rheological properties of typical chernozems (Kursk oblast) under different land uses), *Pochvovedenie*, 2016, No. 8, pp. 955–963.

11. Khitrov N.B., Ponizovskii A.A., *Rukovodstvo po laboratornym metodam issledovaniya ionno-solevogo sostava neutral'nykh i shchelochnykh mineral'nykh pochv* (A guide to laboratory methods for studying of ion-salt composition of neutral and alkaline mineral soils), Moscow: VASKhNIL, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 1990, 236 p.
12. Khitrov N.B., Khaidapova D.D., Vyazkouprugoe povedenie vertikovogo solontsa Kamennoi Stepi (Viscoelastic Behavior of Vertic Solonetz in the Kamennaya Steppe), *Pochvovedenie*, 2019, No. 7., pp. 843–858.
13. Kholopov Yu.V., Khaidapova D.D., Lapteva E.M., Reologicheskie svoystva severo-taezhnykh avtomorfnykh i poligidromorfnykh kriometamorficheskikh pochv Evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Respublika Komi) (Rheological Properties of Automorphic and Semihydromorphic Cryometamorphic Northern Taiga Soils in Northeastern European Russia (Komi Republic)), *Pochvovedenie*, 2018, No. 4., pp. 439–450.
14. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv (Soil Physics)*, Moscow: Izd-vo Mosk. Un-ta, 2005, 432 p.
15. Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Khaidapova D.D., Pozdnyakov A.I., Tyugai Z., Pochatkova T.N., Dembovetskii A.V., *Praktikum po fizike tverdoi fazy pochv* (Physics of Solid phase: Study Guide), Moscow: Buki Vedi, 2017, 119 p.
16. Abbireddy C.O.R., Clayton C.R.I., The impact of particle form on the packing and shear behaviour of some granular materials: an experimental study, *Granular Matter*, 2015. Vol. 17, No. 4, pp. 427–438.
17. Armenise E., Redmile-Gordon M., Stellacci A.M., Ciccarese A., Rubino P., Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment, *Soil Tillage Research*, 2013, Vol. 130, pp. 91–98.
18. Barré P., Hallett P.D., Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy, *European Journal of Soil Science*, 2009, Vol. 60, pp. 525–538.
19. Bronick C.J., Lal R., Soil structure and management: A review, *Geoderma*, 2005, Vol. 124, pp. 3–22.
20. Buchmann C., Bentz J., Schaumann G.E., Intrinsic and model polymer hydrogel-induced soil structural stability of a silty sand soil as affected by soil moisture dynamics, *Soil Tillage Research*, 2015, Vol. 154, pp. 22–33.
21. Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., Deyn G.D., Goedy R.D., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Willem J., Groenigen V., Brussaard L., Soil quality – A critical review, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, Vol. 120, pp. 105–125.
22. Dexter A.R., Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture,

- density, and organic matter, and effects on root growth, *Geoderma*, 2004, Vol. 120, pp. 201–214.
23. Gliński J., Horabik J., Lipiec J. (Eds), *Encyclopedia of agrophysics*, Dordrecht: Springer, 2011, 1028 p.
24. *Food security and soil quality*, eds. R. Lal and B.A. Stewart. Boca Raton, USA: Taylor and Francis Group, 2010. 407 p.
25. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R., Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses, *Geoderma*, 2017, Vol. 295, pp. 129–141.
26. Holthusen D., Pértile P., Reichert J. M., Horn R., Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions, *Soil Tillage Research*, 2019, Vol. 191, pp. 282–293.
27. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H., Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil Tillage Research*, 2019, Vol. 195.
28. Kock I., Huhn K., Influence of particle shape on the frictional strength of sediments – A numerical case study, *Sedimentary Geology*, 2007, Vol. 196, No. 1–4, pp. 217–233.
29. Lal R., Shukla M.K., *Principles of soil physics*, New York, Basel: Marcel Dekker, 2004, 682 p.
30. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R., Influence of organic matter on rheological properties of soil, *Applied Clay Science*, 2012, Vol. 64, pp. 25–33.
31. Markgraf W., Horn R., Rheological stiffness analysis of K⁺-treated and CaCO₃-rich soils, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, Vol. 169, pp. 411–419.
32. Markgraf W., Horn R., Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2007, Vol. 71, No. 3, pp. 851–859.
33. Markgraf W., Moreno F., Horn R., Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques, *Vadose Zone Journal*, 2012, Vol. 11, pp. 1–11.
34. Mezger T.G., *The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers*, Hanover: Vincentz Network, 2014, 4th edition, 434 p.
35. Mitchell J.K., Soga K., *Fundamentals of soil behavior*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2005, 3rd edition, 577 p.
36. Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A., Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils,

Revista Brasileira de Ciencia do Solo, 2016, Vol. 40, pp. 2–14.

37. Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M., Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities, *Scientia Agricola*, 2018, Vol. 75, No. 2, pp. 154–162.

38. Phogat V.K., Tomar V.S., Dahiya R., Soil Physical Properties, *Soil Science: An Introduction*, Indian Society of Soil Science, 2016, First edition. pp. 135–171.

39. Reynolds D., Bowman B.T., Drury C.F., Tan C.S., Lu X., Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters, *Geoderma*, 2002, Vol. 110, pp. 131–146.

40. Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Tan C.S., Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions, *Geoderma*, 2008, Vol. 146, pp. 466–474.

41. Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., Yang, X.M., Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physical quality, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, pp. 252–263.

42. Schoenholtz S.H., Miegroet H., van Burger J.A., A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities, *Forest and Ecology Management*, 2000, Vol. 138, pp. 335–356.

43. Shukla M.K., Lal R., Ebinger M., Determining soil quality indicators by factor analysis, *Soil Tillage Research*, 2006, Vol. 87, pp. 194–204.

44. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Deneff K.A., History of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Soil Tillage Research*, 2004, Vol. 79, pp. 7–31.

45. Stoppe N., Horn R., Microstructural strength of tidal soils – A rheometric approach to develop pedotransfer functions, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018, Vol. 66, No. 1, pp. 87–96.

46. Terzaghi K., Peck R.B., Nesri G., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: John Wiley & Sons, 1996, 3rd edition, 417 p.

47. Ye C., Guo Z., Cai C., Wang J., Deng J., Effect of water content, bulk density, and aggregate size on mechanical characteristics of Aquults soil blocks and aggregates from subtropical China, *Journal of Soils and Sediments*, 2016, Vol. 17, No. 1, pp. 210–219.

48. Zhang H.Q., Hartge K.H., Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter, *Soil Technology*, 1990, No. 3, pp. 311–326.