

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ЕСТЕСТВЕННОГО И НАРУШЕННОГО СЛОЖЕНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ И АГРОДЕРНОВО- ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2017 г. В. В. Ключева^{1,2}, Д. Д. Хайдапова²

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

²*МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119991, Ленинские горы,
e-mail: vvklyueva@gmail.com*

Исследованы реологические свойства дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почв естественного и нарушенного сложения: пастообразных и монолитных образцов горизонтов двух профилей методом амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria). По кривым модулей упругости и вязкости определены диапазоны вязкоупругого поведения почвенных паст и монолитов, модуль упругости в диапазоне вязкоупругого поведения как характеристика прочности структурных связей, переход от вязкоупругого к вязкому поведению – пересечение модулей упругости и вязкости. Установлено, что диапазон устойчивости монолитных образцов больше пастообразных, они характеризуются более прочными структурными связями в области вязкоупругого поведения. Однако разрушение структуры в монолитных образцах происходит при меньших значениях деформации, чем в пастообразных. Дифференциация значений реологических показателей верхней части профиля дерново-подзолистой почвы обусловлена большим содержанием органического вещества в гумусовом горизонте и облегчением гранулометрического состава в элювиальном горизонте. Прочность структурных связей образцов нижних горизонтов дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы отличается незначительно.

Ключевые слова: структура почвы, реология, метод амплитудной развертки, реометр

DOI: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35

ВВЕДЕНИЕ

Структура почвы – один из важнейших факторов, определяющих водный, воздушный, тепловой обмен. Наиболее распространенным определением понятия «структура почвы» является

тезис о том, что это форма и размер структурных отдельностей в виде макроагрегатов (педов), на которые распадается почва ([Шеин, 2005](#)). Однако размер и форма структурных отдельностей во многом обусловлены составом, расположением и соотношением в них элементарных почвенных частиц. Е.М. Сергеев отмечал, что в определении структуры важно обращать внимание на характер взаимосвязи слагающих элементов структуры между собой, который может проявляться в прочности структурных отдельностей ([Сергеев, 1982](#)). Прочность учитывает две группы разных свойств: химические (активность и число центров на поверхности твердых частиц почвы) и физические (пористость, удельную поверхность, плотность) ([Воронин, 1984](#)).

Для оценки прочности почвенной структуры существует несколько реологических методов. Первый – метод конического пластометра Ребиндера для определения предельного напряжения сдвига в дисперсных системах, определяемого по предельному напряжению конуса, вызываемого определенной нагрузкой. Накоплен большой экспериментальный материал в области применения этого метода ([Абрукова, 1980](#); [Хайдапова, Пестонова, 2007](#)). Второй – методы коаксиальных цилиндров на приборе Реотест-2 и ротационного вискозиметра Воляровича (ВР-8). С помощью данных методов можно построить реологические кривые зависимостей скорости деформации и вязкости от напряжения сдвига суспензии почвы и характеризовать ее по типу структурных связей ([Горькова, 1965](#); [Абрукова, 1970](#); [Манучаров, Абрукова, 1983](#)). Третий метод амплитудной развертки основан на технике реометрии на приборах серии MCR (modular compact rheometer). Применимость данной техники в почвоведении доказана в ряде отечественных и зарубежных работ ([Markgraf et al., 2006, 2009](#); [Хайдапова и др., 2014, 2016](#); [Шеин и др., 2014](#)). Реометрический метод амплитудной развертки позволяет не только провести определение показателей микроструктуры почвы: вязкости, упругости, характера вязкоупругого поведения, точки разрушения структуры, но и уловить небольшие изменения этих показателей. Одной из отличительных особенностей метода является возможность проведения испытаний не только на почвенных пастах, но и на образцах с ненарушенной структурой и естественными межчастичными связями – монолитах, что существенно расширяет возможности исследования и интерпретации полученных данных.

Цель исследования – изучение реологического поведения образцов дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы ненарушенного сложения (монолитов) и сравнение его с реологическими свойствами нарушенных образцов (пастообразных) двух различных биоценозов: полевого и лесного.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования явились пастообразные и монолитные образцы горизонтов профилей дерново-подзолистой (гор. АУ, ЕЛ, ВЕЛ, ВТ1, ВТ2) и агродерново-подзолистой почв (гор. Р1, Р2, ВЕЛ, ВТ1, ВТ2). Названия горизонтов даны согласно классификации 2004 г. ([Классификация ..., 2004](#)). Разрез дерново-подзолистой почвы заложен в лесном массиве (сложный ельник) рядом с с. Ельдигино Пушкинского района Московской области, разрез агродерново-подзолистой почвы – на опытном поле Зеленоградского стационара Почвенного института им. В.В. Докучаева (залежь). Время отбора образцов – июль 2016 г.

Объекты исследования находятся в умеренном климатическом поясе, район относится к центральной части Восточно-Европейской (Русской) равнины Смоленско-Московской эрозионно-моренной возвышенности. Почвообразующие породы представлены покровными суглинками.

Гранулометрический состав почвенных образцов измеряли методом лазерной дифракции на приборе Analysette 22 (Fritsch, Germany) с предварительной ультразвуковой диспергацией почвенной суспензии в течение 5 мин. По классификации Качинского изучаемые почвы относятся к тяжелосуглинистым крупнопылеватым, по международной классификации USDA – silt (суглинок тонкий). Для лесного профиля наблюдается более выраженная дифференциация содержания физической глины в образцах горизонтов по сравнению с полевым профилем.

Определение содержания общего углерода в почве проводили с помощью экспресс-анализатора АН-7529 (Измеритель, г. Гомель) методом сухого сжигания в потоке кислорода. Содержание общего углерода в гумусовых горизонтах – 1.46 и 2.43% для полевого и лесного профилей соответственно, наблюдается резкая дифференциация содержания общего углерода по горизонтам. Полученные данные представлены в табл. 1.

Реологические параметры почвенных образцов изучали методом амплитудной развертки на модульном компактном реометре MCR-302 (Anton Paar, Австрия) с измерительной системой параллельных плато PP-25. Параметры измерения: программа Start Rheoplus – режим Amplitude Sweep, количество точек измерения – 30, длительность измерения одной точки – 15 с, угловая частота измерения – 0.5 Гц, диапазон деформации (напряжения) γ от 0.001 до 100% I_g , контроль нормальной силы (сила воздействия верхнего плато) $NF < 5\text{ N}$ для пастообразных образцов и $< 15\text{ N}$ для монолитных, постоянная температура 20°C. Постоянство температуры обеспечивали элементами Пельтье.

При подготовке паст образцы горизонтов растирали пестиком с резиновым наконечником и просеивали через сито 1 мм. Затем цилиндры с диаметром 25 мм, подобранные по размеру измерительной системы, наполняли 3 г воздушно-сухого образца, слабо надавливая 3 раза, выравнивали поверхность почвенной таблетки поршнем и ставили на дощечку, покрытую фильтровальной бумагой, в кристаллизатор с дистиллированной водой для капиллярного насыщения в течение суток. Вырезанный в полевых условиях образец-монолит вынимали из формирующей коробки и также ставили на фильтровальную бумагу на насыщение в кристаллизатор в течение трех суток. После насыщения с помощью однолезвиевого безопасного лезвия с выровненной поверхности монолита в круглую форму вырезали монолит необходимого диаметра для исследования. Влажность исследуемых образцов определяли весовым методом после выполнения амплитудного теста с помощью анализатора влажности MX-50 (табл. 2).

Метод амплитудной развертки (AST) или осцилляционный амплитудный тест является колебательным методом, в котором зажаты между двумя параллельными плоскостями-плато образец подвергается механическому воздействию осцилляционных движений с увеличением амплитуды верхней плоскости при постоянной температуре и частоте. Осцилляционный амплитудный тест заключается в том, что образец подвергают осциллирующим напряжениям или деформации. Испытания с осциллирующими напряжениями часто называют динамическими. При динамических испытаниях получают данные о вязкой и упругой реакциях образца ([Mezger, 2011](#)).

Таблица 1. Некоторые физические и химические свойства дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почв

Горизонт (глубина/мощность, см)	Содержание фракции (%); размер частиц, мм						Гранулометрический состав	С _{общ} , %		
	<0.001	0.001–0.002	0.002–0.005	0.005–0.01	0.01–0.05	>0.01				
Дерново- подзолистая почва (лесной профиль)										
AY (4-15/9)	1.63	6.15	17.85	16.06	55.84	2.47	41.69	58.31	Суглинок тяжелый	2.43
EL (15-28/13)	1.42	4.79	13.61	14.56	62.60	3.02	34.38	65.62	Суглинок средний	0.31
BEL (28-35/7)	5.54	6.60	15.10	14.49	56.46	1.81	41.72	58.28	Суглинок тяжелый	0.18
BT1 (35-70/35)	6.23	8.85	17.53	13.89	51.84	1.66	46.50	53.50	»	0.13
BT2 (70-100/30)	6.97	10.54	20.07	15.04	45.97	1.41	52.62	47.38	Глина легкая	0.12
Агродерново-подзолистая почва (полевой профиль)										
P1 (0-26/26)	3.27	7.44	15.29	14.18	56.83	2.99	40.18	59.82	Суглинок тяжелый	1.46
P2 (26-30/4)	3.39	7.07	14.95	14.30	57.01	3.27	39.71	60.29	Суглинок средний	1.19
BEL (30-65/35)	5.41	7.00	14.47	13.77	57.37	1.99	40.65	59.35	Суглинок тяжелый	0.27
BT1 (65-85/20)	6.50	8.49	16.10	13.98	53.34	1.58	45.08	54.92	»	0.23
BT2 (85-115/30)	7.28	10.3	17.53	13.70	50.15	1.04	48.81	51.19	»	0.22

Таблица 2. Средние значения влажности монолитных и пастообразных образцов горизонтов дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почв

Горизонт	Влажность, %	
	паста	монолит
Дерново-подзолистая почва		
AY	64.2	51.6
EL	38.0	26.3
BEL	49.2	24.0
BT1	48.9	22.7
BT2	49.2	22.7
Агродерново-подзолистая почва		
P1	51.9	31.3
P2	51.1	27.4
BEL	50.5	23.4
BT1	56.9	33.4
BT2	51.6	24.0

В испытании используется модель двух пластин: верхняя плита попеременно отклоняются по синусоидальной временной функции на малый угол ϕ вправо и влево. Это вызывает аналогичную синусоидальную деформацию образца, помещенного в измерительный зазор и соответствующую синусоидальную картину изменения напряжений, амплитуда которых связана с природой испытываемого образца ([Шрамм, 2003](#); [Mezger, 2011](#)).

Для характеристики поведения образца анализировали следующие показатели:

Модуль упругости G' [Па] – мера энергии деформации, сохраненной образцом во время процесса сдвига. После снятия сдвигающего усилия эта энергия полностью сохранена и выступает в качестве движущей силы для процесса преобразования частичной или полной компенсации ранее полученной деформации структуры. Модуль упругости представляет упругое поведение материала.

Модуль вязкости G'' [Па] – мера энергии деформации, израсходованной во время процесса сдвига и потерянной для образца. Эта энергия потрачена во время процесса изменения структуры материала, т.е. при частичном или полном течении образца. Таким образом, G'' представляет вязкое поведение испытываемого образца.

Диапазон линейного вязкоупругого поведения (linear viscoelastic range – LVE-range) – область, где обе кривые G' и G'' имеют область постоянных величин в виде плато, но в большинстве случаев на различных уровнях. Структура образца не нарушается с увеличением деформации, данная область считается диапазоном устойчивости образца к нагрузкам. Упругое поведение преобладает над вязким. При этом значение модуля упругости в данной области говорит о прочности межчастичных связей в почвенном образце.

Точка пересечения модулей упругости и вязкости или точка разрушения структуры (Crossover) – точка равенства модулей упругости G' и вязкости G'' . После нее вязкое поведение преобладает над вязкоупругим поведением.

На рис. 1 представлены результаты осцилляционного амплитудного теста на примере пастообразного образца гор. АУ дерново-подзолистой почвы. На нем можно выделить следующие области:

1. Диапазон линейного вязкоупругого поведения LVE-range.
2. Переходная область от начала понижения кривых модулей до их пересечения в точке Crossover. (Точка Crossover – место равенства модулей упругости и вязкости.) В этой области пластичного поведения структура образца нарушена и не полностью восстанавливается.
3. Область, где вязкое поведение преобладает над упругим, деформация становится необратима ([Mezger, 2011](#)).

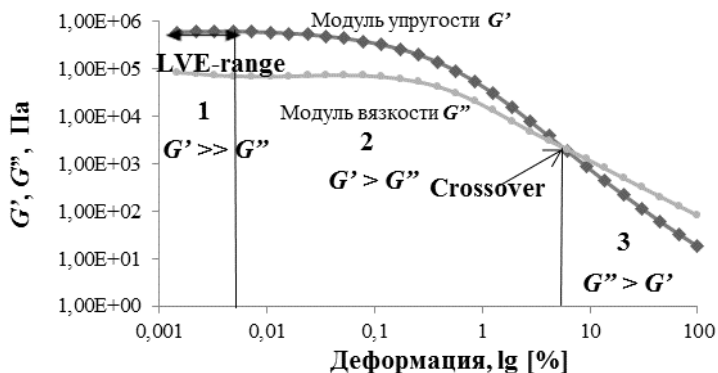


Рис. 1. Результаты осцилляционного амплитудного теста пастообразного образца гор. АУ дерново-подзолистой почвы.

Подробная теория метода и определения терминов представлены в работах: [Шрамм, 2003](#); [Markgraf et al., 2006](#), [2009](#); [Mezger, 2011](#); [Хайдапова и др., 2014](#), [2016](#).

Измерения проведены в трехкратной повторности для паст и четырех–семикратной – для монолитов, для показателей рассчитано среднее и доверительный интервал для среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Диапазон линейного вязкоупругого поведения (LVE-range). Изучаемые образцы характеризуются небольшим диапазоном линейного вязкоупругого поведения, не превышающим 0.007% деформации (рис. 2). Для паст из образцов почв лесного профиля не выявлено статистически значимых отличий. Для монолитных образцов почв лесного профиля проявляется дифференциация значения показателя по глубине: наблюдается его уменьшение в элювиальном горизонте в три раза по сравнению с гумусовым горизонтом, в нижних горизонтах величина LVE-range увеличивается, однако разница между гор. BEL, BT1, BT2 не значительна. В образцах почв полевого профиля в отличие от образцов лесного профиля нет резкой дифференциации: отсутствуют статистически значимые отличия в ряду паст и в ряду монолитов. В обоих профилях значение диапазона вязкоупругого поведения монолитов больше паст при значимых отличиях. При совместном анализе результатов теста для пастообразных образцов лесного и полевого профилей выявлена прямая зависимость между значением

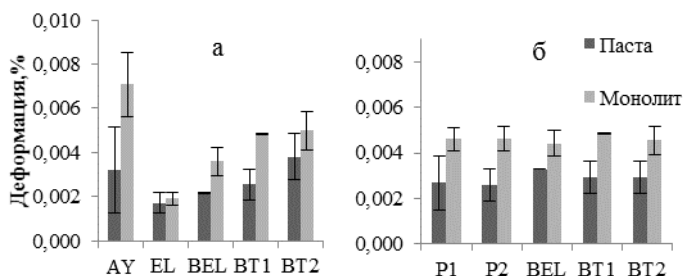


Рис. 2. Диапазон линейного вязкоупругого поведения монолитных и пастообразных образцов лесного (а) и полевого (б) профилей.

показателя и содержанием физической глины (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.76$) – коэффициент значим при данном объеме выборки. Для монолитных образцов не выявлено корреляционных взаимосвязей.

Модули упругости G' и вязкости G'' в диапазоне вязкоупругого поведения. Для паст образцов горизонтов лесного и полевого профилей не было выявлено статистически значимых отличий (рис. 3). Монолиты гумусовых горизонтов обоих профилей имеют минимальное значение модуля упругости, наблюдается повышение значения более, чем в 5 раз в элювиальном горизонте лесного профиля, для полевого профиля наблюдается более слабая дифференциация, но также выявляется тенденция к увеличению значения. Скорее всего, это связано с тем, что в богатом органическим веществом гумусовом горизонте при набухании содержится больше воды, которая препятствует образованию близких межчастичных контактов в отличие от нижележащих горизонтов с меньшим содержанием органического вещества. Монолитные образцы имеют больший модуль упругости G' в диапазоне вязкоупругого поведения, чем пастообразные. Анализ данных монолитных образцов показал, что существует обратная зависимость значений данного показателя с содержанием общего углерода (коэффициент корреляции Пирсона $r = -0.78$) (коэффициент значим при данном объеме выборки). Для пастообразных образцов не выявлено корреляционных зависимостей.

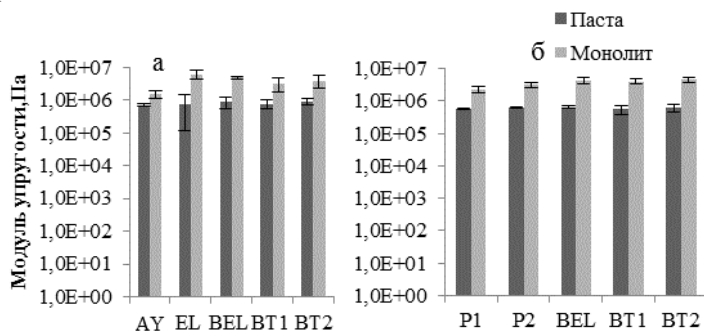


Рис. 3. Модуль упругости G' в диапазоне линейного вязкоупругого поведения монолитных и пастообразных образцов лесного (а) и полевого (б) профилей.

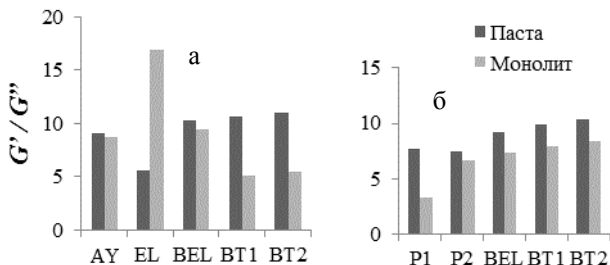


Рис. 4. Отношение значений модуля упругости G' к модулю вязкости G'' в диапазоне линейного вязкоупругого поведения монолитных и пастообразных образцов лесного (а) и полевого (б) профилей.

Значение модуля вязкости G'' меньше значений модуля упругости G' в 3–17 раз в диапазоне линейного вязкоупругого поведения (рис. 4). В монолитных и пастообразных образцах почв полевого профиля отношение значений модулей увеличивается от верхних гумусовых до нижних минеральных горизонтов. Для лесного профиля картина более сложная: прослеживается элювиально-иллювиальная дифференциация с максимумом отношения в гор. EL для монолитов и минимумом для пастообразных образцов.

Отличия между пастами и монолитами, выявляемые по показателям LVE-range и модулю упругости G' в диапазоне вязкоупругого поведения, говорят о том, что устойчивость естественных структурных связей в монолитах к деформационным воздействиям значительно больше, чем в искусственных пастах. Значения модулей упругости в монолитных образцах превышают эти показатели в пастах в 2–8 раз.

Точка пересечения (равенства) модулей упругости и вязкости. Для паст образцов горизонтов лесного и полевого профилей не выявлено статистически значимых отличий. В рядах монолитов наибольшее значение напряжения или деформации, соответствующее точке пересечения модулей упругости и вязкости, после которого почва переходит в вязкое состояние, характерно для гумусовых горизонтов. Значение показателя уменьшается в нижних горизонтах профилей (рис. 5).

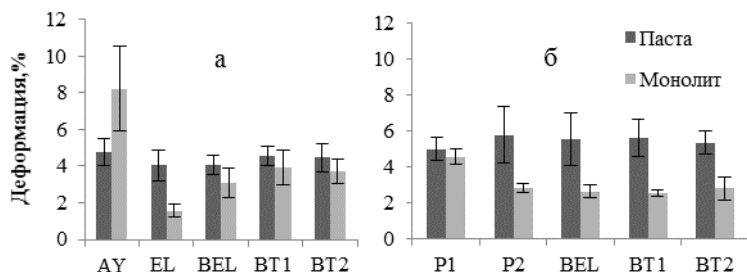


Рис. 5. Значение деформации в точке пересечения модулей упругости и вязкости (точке разрушения структуры) монолитных и пастообразных образцов лесного (а) и полевого (б) профилей.

Лесной профиль более дифференцирован, чем полевой: для лесного профиля характерно минимальное значение деформации, при которой происходит разрушение структуры, в элювиальном гор. EL с увеличением значения данного показателя в переходном гор. BEL и минеральных BT1, BT2 (отличия между ними не значимы); для полевого профиля максимальное значение характерно для верхнего агрогоризонта, нижние горизонты имеют меньшие значения деформации при незначимых отличиях между собой. Это можно объяснить тем, что образцы горизонтов с небольшим содержанием углерода имеют более жесткие межчастичные контакты и, соответственно, меньшую область упруго-пластичного поведения.

При этом значения деформации в точке разрушения структуры паст больше (кроме гор. AY лесного профиля), чем монолитов (при статистически значимых отличиях), их поведение более пластично. Монолитные образцы, имея более прочные структурные связи в диапазоне линейного вязкоупругого поведения, разрушаются при меньших значениях деформации, показывая более хрупкое поведение по сравнению с пастами, характеризующимися большим диапазоном пластичного поведения. Анализ данных показал, что существует прямая зависимость данного показателя в монолитных образцах с содержанием общего углерода (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.81$), коэффициенты статистически значимы при данном объеме выборки. Для пастообразных образцов не выявлено корреляционных зависимостей.

ВЫВОДЫ

1. Дифференциация значений реологических показателей верхней части профиля дерново-подзолистой почвы обусловлена большим содержанием органического вещества в гумусовом горизонте и облегчением гранулометрического состава в элювиальном горизонте. Прочность структурных связей образцов нижних горизонтов дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы отличается незначительно.

2. Исследованные образцы имеют небольшой диапазон устойчивости к нагрузкам, при этом его значение для монолитных образцов больше, чем для пастообразных.

3. Монолитные образцы характеризуются более прочными естественными структурными связями в области вязкоупругого поведения по сравнению с пастообразными, превышение составляет 2–8 раз.

4. Разрушение структуры в монолитных образцах происходит при меньших значениях деформации, чем в пастообразных: их поведение более хрупко, пастообразные образцы проявляют большую пластичность.

5. В монолитных образцах по сравнению с пастообразными ярче выражены различия реологического поведения, они являются отражением физико-химических, структурных свойств исследуемых объектов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-04-01111.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абреков Л.П.* Изучение тиксотропных свойств почв с помощью ротационного вискозиметра // Почвоведение. 1970. № 8. С. 83–90.
2. *Абрукова Л.П.* Применение конического пластометра для исследования прочностных свойств почв // Почвоведение. 1980. № 7. С. 147–155.
3. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
4. *Горькова И.М.* Структурные и деформационные особенности осадочных пород различной степени уплотнения и литификации. М.: Наука, 1965. 128 с.
5. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

6. Манучаров А.С., Аbruкова В.В. Структурно-механические свойства дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1983. № 4. С. 64–73.
7. Сергеев Е.М. Инженерная геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. 248 с.
8. Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В. Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно нарушенных почвах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 6. С. 53–57.
9. Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А. Прочность межчастичных связей в почвенных пастах и агрегатах // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1330–1335.
10. Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963.
11. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
12. Шеин Е.В., Болотов А.Г., Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н. Реологические свойства черноземов Алтайского Приобья // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 8. С. 32–38.
13. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. Пер. с англ. под ред. В.Г. Куличихина. М.: Колосс, 2003. 312 с.
14. Markgraf W., Horn R., Gragg L., Cassell J. Rheological Investigations in Soil Micro Mechanics: Measuring Stiffness Degradation and Structural Stability on a Particle Scale // Progress in Management Engineering. Nova Science Publishers, Hauppauge. 2009. P. 237–279.
15. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil & Tillage Research. 2006. V. 91. P. 1–14.
16. Mezger T. The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers. Hanover: Vincentz, 2011. 436 p.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF NATURAL AND DISTURBED STRUCTURE SAMPLES OF SODDY- PODZOLIC AND AGRO SODDY-PODZOLIC SOIL

V. V. Klyueva^{1,2}, D. D. Khaydapova²

¹*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Russia, 119017, Moscow, Pyzhevskii per. 7-2*

²*Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1*

The rheological properties of two profile's horizons of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soil were studied by the amplitude sweep test on a rhe-

ometer MCR-302 (Anton Paar, Austria) on samples of natural structure (pastes) and disturbed structure (monoliths). Curves of the elasticity and viscosity modules determine the linear viscoelasticity range (LVE-range) of soil pastes and monoliths, the elastic modulus in linear viscoelasticity range as a characteristic of strength of structural bonds, the transition from viscoelastic to viscous behavior—the intersection of the elasticity and viscosity modules. It is established that the LVE-range of monolithic samples is more than paste samples, they are characterized by stronger structural bonds in the linear viscoelastic range; however, the destruction of structure in monolithic samples occurs at lower deformation values than in paste samples. The differentiation of the rheological parameter values of the upper part of profile of soddy-podzolic soil is caused by the large content of organic matter in the humus horizon and the facilitation of the soil texture in the eluvial horizon. The strength of structural bonds of the samples of the lower horizons of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soils differ insignificantly.

Keywords: soil structure, rheology, amplitude sweep test, rheometer

REFERENCES

1. Abrukova L.P. Study of thixotropic properties of soils with the help of a rotational viscometer, *Pochvovedenie*, 1970, No. 8, pp. 83–90. (in Russian)
2. Abrukova L.P. Application of a conical plastometer for the study of strength properties of soils, *Pochvovedenie*, 1980, No. 7, pp. 147–155. (in Russian)
3. Gor'kova I.M. *Structural and functional hydrophysics of soils*, Moscow, Nauka Publ., 1965, 128 p. (in Russian)
4. Khaydapova D.D., Chestnova V.V., Shein Ye.V., Milanovskiy Ye.Yu. Rheological Properties of Typical Chernozems (Kursk Oblast) under Different Land Uses, *Eurasian Soil Science*, 2016. V. 49 (8), pp. 890–897. doi: 10.1134/S1064229316080044
5. Khaydapova D.D., Milanovskiy Ye.Yu., Chestnova V.V. Evaluation of soil structure recovery under the effect of tree windbreak cultivation on anthropogenically disturbed soils by rheological methods, *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No. 6, pp 53–57. (in Russian)
6. Khaydapova D.D., Pestonova E.A. Strength of Interparticle Bonds in Soil Pastes and Aggregates, *Eurasian Soil Science*, 2007, No. 11.
7. *Classification and diagnosis of soil Russia*, Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p. (in Russian)
8. Manucharov A.S., Abrukova V.V. Strength of interparticle bonds in soil pastes and aggregates, *Pochvovedenie*, 1983, No. 4, pp.64–73. (in Russian)

9. Schramm G. A practical approach to rheology and rheometry, Moscow, Koloss Publ., 2003, 312 p. (in Russian)
10. Sergeev E.M. *Engineering geology*, Moscow, Moscow State University Publ., 1982, 248 p. (in Russian)
11. Shein Ye.V. *Course of soil physics*, Moscow, Moscow State University Publ., 2005, 432 p. (in Russian)
12. Shein Ye.V., Bolotov A.G., Khaydapova D.D., Milanovskiy Ye.Yu, Tyugay Z.N., Pochatkova T.N. Rheological properties of the chernozems of the Altai Priobye (the Ob river area), *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, No. 8, pp. 32–38. (in Russian)
13. Voronin A.D. *Fundamentals of practical rheology and rheometry*, Moscow, Moscow State University Publ., 1984, 204 p. (in Russian)
14. Markgraf W., Horn R., Gragg L., Cassell J. Rheological Investigations in Soil Micro Mechanics: Measuring Stiffness Degradation and Structural Stability on a Particle Scale, *Progress in Management Engineering. Nova Science Publishers*, Hauppauge, 2009, pp. 237–279.
15. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils, *Soil & Tillage Research*, 2006, V. 91, pp. 1–14.
16. Mezger T. *The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers*, Hanover, Vincentz, 2011, 436 p.

Ссылки для цитирования

Клюева В. В., Хайдапова Д. Д. Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 21-35. doi: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35

Klyueva V.V., Khaydapova D.D. Rheological properties of natural and disturbed structure samples of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soil, *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, Vol. 89, pp. 21-35. doi: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35