ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2016, № 8, с. 955–963

ФИЗИКА ПОЧВ

УДК 631.431

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ ТИПИЧНЫХ (КУРСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ

© 2016 г. Д. Д. Хайдапова, В. В. Честнова, Е. В. Шеин, Е. Ю. Милановский

МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы

e-mail: dkhaydapova@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.06.2015 г.

Реологические характеристики гумусовых горизонтов черноземов типичных в различных условиях землепользования (на целине (некосимая степь), под лесным массивом (дубрашина), длительным черным паром, под лесополосой и при сельскохозяйственном использовании) исследованы методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302 при влажностях максимального набухания и предела текучести. По кривым модулей упругости и вязкости определены диапазоны упругого, вязкоупругого (пластичного) поведения почвенных паст и переход от упруговязкого к вязкому течению. Показано, что реологическое поведение в значительной степени определяется содержанием органического вещества, которое может играть как роль связующего агента, структурирующего межчастичные связи, так и роль смазки при вязкотекучем состоянии почвенных паст. Образцы, богатые органическим веществом (целина, дубрашина, лесополоса), обладают более пластичным поведением и большей устойчивостью к нагрузкам. Образцы с меньшим содержанием органического вещества (длительный пар, пашня) отличались более жестким межчастичным сцеплением и меньшим диапазоном устойчивости к нагрузкам. Почвенные пасты при влажности предела текучести характеризуются большей прочностью межчастичного сцепления и хрупким поведением, чем при влажности максимального набухания. Рассматриваются методические аспекты проведения испытаний на почвенных пастах при постоянной толщине образца и контроле нормальной силы давления на образец. Для набухающих образцов почв предпочтительнее проводить испытания при контроле нормальной силы.

Ключевые слова: реология почв, метод амплитудной развертки, модульный реометр, органическое вещество черноземов

DOI: 10.7868/S0032180X16080049

ВВЕДЕНИЕ

В почвоведении распространено представление о структуре почвы как совокупности почвенных агрегатов, образующихся из элементарных почвенных частиц, взаимно удерживающихся в силу коагуляции коллоидов, склеивания, слипания их в результате действия сил Ван-дер-Ваальса, остаточных валентностей и водородных связей, адсорбционных и капиллярных явлений в жидкой фазе, а также с помощью корневых тяжей и гифов грибов. При выделении форм структуры в почвоведении сформировались два подхода, которые принято называть морфометрическим и энергетическим [8]. Наибольшее распространение получил первый, при котором в основу понятия “структура” положены морфометрические особенности агрегатов и их соотношение в почве – размеры, формы, взаиморасположение [6]. При втором подходе понятие структуры основывается на таких параметрах, как характер взаимодействия структурных элементов, оценка сил взаимосвязи и сцепления между частицами, структура порового пространства, что выражается в физико-механических свойствах почвы: плотность, твердость, водоустойчивость, липкость, пластичность, сопротивление сдвигу, сцепление, водо-, воздухопроницаемость и др. В этом подходе обобщающим свойством почвенной структуры, связанным со всеми ее элементами (состав, размер, форма и характер поверхности почвенных частиц слагающих агрегаты и др.), является механическая прочность и ряд таких реологических свойств почв, как вязкость, упругость, их совместное проявление, вязкоупругое поведение и др. [6, 8].

Реологические свойства почв являются функциональными проявлениями поверхностных свойств твердой фазы почв, определяющих образование, устойчивость и деградацию почвенной структуры. Первыми начали применять реологические подходы для исследований структурных свойств почв в 70–80-х годах прошлого столетия Горькова, Абрукова, Манучаров и др. [1, 2, 7, 9]. Исследования реологических характеристик почв на Реотесте-2 методом коаксиальных цилиндров показали ряд интересных полуколичественных характеристик поведения почвенных образцов,

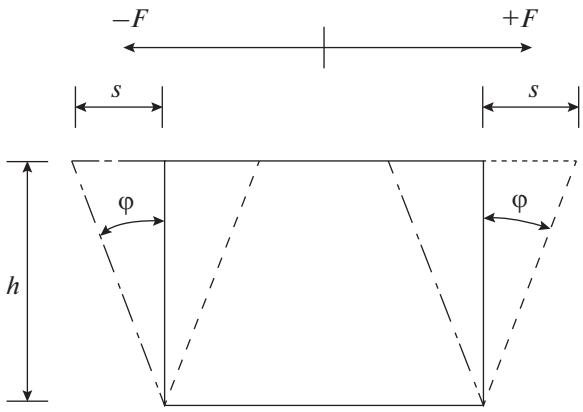

Рис. 1. Осцилляционный метод: сила сдвига $\pm F$, расстояние отклонения $\pm s$ и угол отклонения $\pm\varphi$ в зазоре между пластинами h (по [25]).

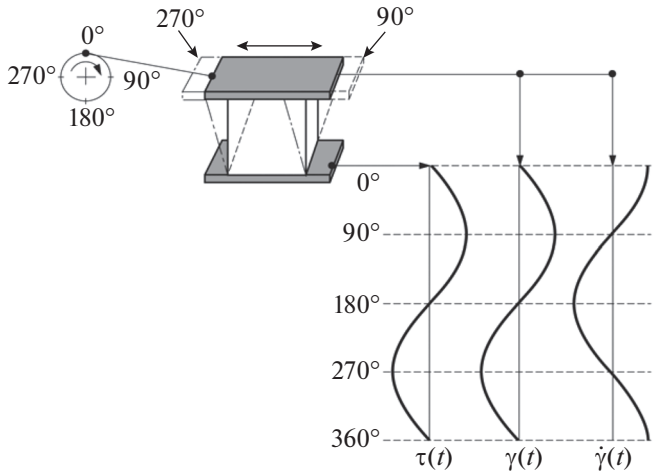

Рис. 2. Двухпластинная модель в осцилляционном методе; идеально упругое поведение: функции с временно́й зависимостью $\tau(t)$, $\gamma(t)$ и $\dot{\gamma}(t)$ в форме синусоидальных и косинусоидальных кривых (по [25]).

относящиеся больше к области вязкого поведения. По форме петель гистерезиса, образующихся при увеличении скорости сдвига и обратном ходе, снижении скорости сдвига, можно описать характер восстановления разрушенных связей и тип структурных связей [15, 21].

В настоящее время появились приборы нового поколения, которые позволяют значительно расширить количество и точность физически обоснованных реологических параметров, с помощью которых становится возможным определение межчастичного взаимодействия и прогнозирование поведения микроструктуры почвы, подвергающейся нагрузкам. В частности, колебательные методы, проводимые параллельными плато реометра MCR-302, применены и рекомендованы для изучения реологических свойств почв рядом исследователей [13, 19, 22–24], как подходящие методы для определения реологического поведения почв, особенно в вязкоупругой области до перехода в область вязкого течения.

В данной работе исследовали вязкоупругие свойства черноземов типичных различного землепользования. Использовали метод амплитудной развертки в осцилляционном режиме с измерительной системой параллельных плато на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия) [25].

Теория метода. Метод амплитудной развертки заключается в том, что образец подвергают осциллирующим напряжениям или деформации. Испытания с осциллирующими напряжениями часто называют динамическими [20, 25]. При динамических испытаниях получают данные о вязкой и упругой реакциях образца в зависимости от скорости воздействия на него, или зависимость осциллирующего напряжения, или деформации от заданной угловой скорости или частоты [20].

Суть метода заключается в том, что образец почвы помещается между двумя плато, верхнее плато подвергается колебаниям с расширяющейся амплитудой с заданной частотой [25]. На рис. 1 расстояние h между пластинами является областью сдвига.

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

Напряжение сдвига τ равно силе F, деленной на площадь пластины A, $\pm\tau$[Па] $= \pm F/A$, и деформация $\pm\gamma = \pm s/h = \pm\mathrm{tg}\varphi$, где s – расстояние отклонения, h – расстояние между двумя плато.

Как показано на рис. 2, движение верхней пластины вызвано вращением двигателя колеса. Результирующая сила измеряется на нижнем плато. Теоретические аспекты данного метода подробно изложены в руководстве по реометрии Мезгера [25]. Как показано на рис. 2, движение верхней пластины вызвано вращением двигателя колеса. Результирующая сила измеряется на нижнем плато. При полном обороте угол вращения составляет 360°. Это соответствует полному циклу колебаний функций с временной зависимостью $\tau(t)$, и $\gamma(t)$ или $\dot{\gamma}(t)$ соответственно. Во время непрерывного вращения, когда колесо передает угловые положения 0° или 180°, верхняя пластина показывает нулевое положение, поэтому $\gamma(t) = 0$ и $\tau(t) = 0$. Однако скорость здесь в максимуме, то есть $\dot{\gamma}(t) = \dot{\gamma}_{max}$. В угловом положении 90° верхняя пластина показывает максимальное отклонение направо, соответственно в 270° происходит максимум отклонения налево. Поэтому здесь $\gamma(t) = \gamma_{max}$ и $\tau(t) = \tau_{max}$ или $\gamma(t) = -\gamma_{max}$ и $\tau(t) = -\tau_{max}$ соответ-

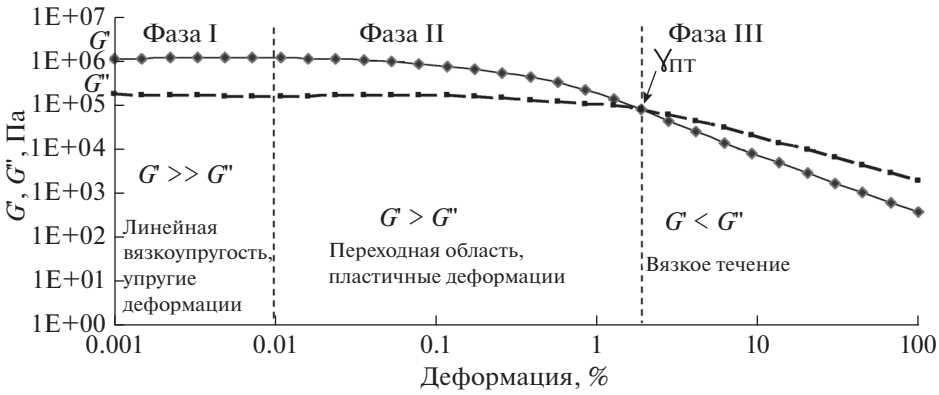

Рис. 3. Модуль упругости G' и модуль вязкости G'' чернозема целинного при влажности предела текучести.

ственно. Скорость при этом равна нулю, то есть $\dot{\gamma}(t) = 0$, в этой точке движение полностью изменяется. При $G^* = \tau(t)/\gamma(t) = \text{const}$, $\tau(t)$ – кривая всегда в фазе с $\gamma(t)$-кривой, то есть обе кривые идут синхронно в форме синусоидальных кривых. Формально деформация может быть представлена как

$$\gamma(t) = \gamma_A \sin \omega t,$$

где γ_A – амплитуда деформации, %; ω – угловая частота, рад/с или $с^{-1}$. Амплитуда измеряется от основной нулевой линии до пика только на одной стороне синусоидальной кривой. Частота осцилляции может быть представлена двумя путями: как угловая частота ω (рад/с или $с^{-1}$) или как частота f (Гц). Эти две частоты связаны следующим уравнением:

$$\omega = 2\pi f, \text{ например, } f = 10 \text{ Гц соответствует}$$

$$\omega = 62.8 \text{ рад/с или } 62.8 \text{ с}^{-1}.$$

Для образцов, показывающих идеально упругое поведение, нет отставания между $\gamma(t)$ и $\tau(t)$ кривыми, то есть нет сдвига фаз, угол сдвига фаз $\delta = 0°$.

В случае идеально вязкого поведения $\gamma(t)$ кривая имеет вид синусоидальной кривой, кривые $\tau(t)$ и $\dot{\gamma}(t)$ – косинусоидальные. Для образцов, показывающих идеально вязкое поведение, существует отставание между $\tau(t)$-кривой и $\gamma(t)$ с углом сдвига фаз 90°.

В большинстве случаев поведение бывает вязкоупругим. При заданной деформации γ: τ-кривая имеет синусоидную форму $\tau(t) = \tau_A \sin(\omega t + \delta)$ с углом δ фазового сдвига между заданной и результирующей кривыми. Угол δ обычно измеряется в градусах. Угол сдвига фаз всегда находится между 0° и 90°, $0° \leqslant \delta \leqslant 90°$.

Для идеально упругого поведения $\delta = 0°$, для идеально вязкого поведения $\delta = 90°$, для вязкоупругого поведения $0° < \delta < 90°$. При исследовании вязкоупругих материалов результирующая синусоида всегда будет показывать определенное отставание по сравнению с заданной кривой [25].

Дадим краткую характеристику получаемых реологических параметров: модуля упругости, модуля вязкости, диапазона линейной вязкоупругости, предела текучести, как точку пересечения модулей, коэффициента потерь, интегральной зоны Z. Программное обеспечение реометра показывает величины модулей упругости и вязкости G' и G'' в виде табличных цифровых данных и виде графиков (рис. 3).

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

Модуль потерь G'' [Па] (loss modulus) – является мерой энергии деформации, израсходованной во время процесса сдвига и потерянной для образца. Эта энергия потрачена на изменение структуры материала при частичном или полном течении образца. Течение или вязкоупругое течение означает относительное движение между молекулами, группами, частицами, агрегатами и другими компонентами структуры такими, как домены или кристаллы. Также существуют силы трения между этими компонентами, и как следствие происходит поднятие температуры, этот процесс называют “вязким нагреванием”. Энергия во время процесса трения рассеивается, часть ее тратится на нагрев образца, часть рассеивается в окружающую среду. Материалы, показывающие необратимую деформацию после цикла нагрузок, имеют измененную форму. Таким образом, G''

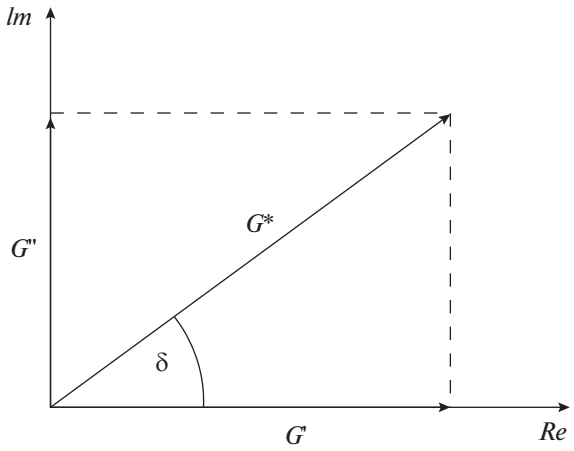

Рис. 4. Векторная диаграмма, показывающая G', G'', G^* и tgδ (по [25]).

представляет вязкое поведение испытуемого образца, будем называть его модуль вязкости.

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

Коэффициент потерь (damping factor) вычисляется как отношение модуля вязкости к модулю упругости и является тангенсом угла δ.

Вязкоупругое поведение любых материалов состоит как из вязкого, так и упругого процесса. На рис. 4 вектор G' находится на оси x, вектор G'' на оси y. G^* – сумма векторов или результирующая двух компонентов G' и G'', она характеризует полное вязкоупругое поведение, состоящее из обоих частей упругой и вязкой. Фактор потерь может быть выражен как отношение стороны противоположной углу δ к стороне прилежащей к углу δ, что является тангенсом угла δ: $\mathrm{tg}\delta = G''/G$.

Угол сдвига фаз и представляет собой tgδ. Условия различных типов поведения вещества представлены в табл. 1 [25].

Интегральная зона Z. Для кумулятивной оценки диапазона устойчивости структурных связей предложено рассчитывать площадь интегральной зоны Z по величине коэффициента потерь, ограниченную с одной стороны начальной величиной амплитуды сдвига, с другой стороны $\mathrm{tg}\delta < 1$ [22].

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

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

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

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

Структурная или реологическая характеристика образца осуществлялась по следующим основным параметрам (рис. 3):

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

2. При маленьких амплитудах (фаза I, рис. 3) в области линейной вязкоупругости обе кривые G' и G'' имеют область постоянных величин в виде плато параллельных оси x. Эта область, ее наличие и диапазон свидетельствуют об устойчивости структурных связей в данном образце при заданных нагрузках.

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

4. Точка пересечения модулей (фаза III, рис. 3) или равенство модуля упругости G' и модуля вязкости G'' свидетельствует о переходе образца из состояния вязкоупругого в вязкое состояние – область разрушения упругой составляющей образца.

Таблица 1. Условия типов поведения веществ (по [25])

Идеально вязкое течение	Поведение вязкоупругой жидкости	Вязкоупругое поведение	Поведение вязкоупругого твердого тела	Идеально упругое поведение
$\delta = 90°$ $\mathrm{tg} = 90°$ $G' \to 0$	$90° > \delta > 45°$ $\mathrm{tg} > 1$ $G'' > G'$	$\delta = 45°$ $\mathrm{tg} = 1$ $G'' = G'$	$45° > \delta > 0°$ $\mathrm{tg} < 1$ $G' > G''$	$\delta = 0°$ $\mathrm{tg} \to 0$ $G'' \to 0$

Таблица 2. Некоторые физические и химические свойства почв

Образец	С общ	Ил (<0.001 мм)	Физическая глина (<0.01 мм)	Набухание	Влажность при максимальном набухании	Влажность при пределе текучести	Удельная поверхность, $м^2/г$
	%						
Некосимая степь	6.8	5.44	42.5	33.5	84.2	55.1	112.9
Дубрашина	6.5	8.98	57.5	30.4	72.9	49.8	114.0
Лесополоса	5.8	5.77	58.4	23.2	75.4	52.1	123.0
Пашня	3.3	8.14	49.4	16.5	63.6	39.9	98.8
Длительный пар	3.0	9.7	53.2	17.2	56.5	35.7	86.6

5. Интегральная зона Z (фаза I и II, рис. 3) характеризует общую величину упругого и пластичного поведения до точки пересечения модулей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись верхние слои (0–10 см) чернозема типичного (по классификации WRB – Haplic Chernozems (Pachic)) некосимой степи, дубового леса (дубрашины), длительного пара, пахотного поля, находящегося в сельскохозяйственном обороте, и прилегающей к нему лесополосы.

Участки некосимой степи, дубрашины и длительного пара расположены в 10 км южнее г. Курска в Стрелецкой степи Центрально-черноземного природного биосферного заповедника им. В.А. Алехина. Участок длительного пара площадью 0.6 га находится среди целинной разнотравно-луговой степи и распахивается дважды в год с 1947 г. До распашки этот участок Стрелецкой степи использовался как сенокосное угодье. Участок сельскохозяйственной пашни находится в 9 км к юго-востоку от Курска. Прилегающая к нему лесополоса посажена на старопахотном поле в 1967 г.

Химические и физические свойства Курских черноземов хорошо изучены и подробно описаны в работах почвоведов [3, 4, 17, 18]. Объекты располагаются в средней части лесостепной полосы Средне-Русской возвышенности в бассейне р. Сейма к югу от Курска. Рельеф местности типично эрозионный. Почвообразующие породы представлены лёссовидными суглинками. Заповедник располагается в полосе умеренно-холодного климата и в зоне умеренного увлажнения.

Гранулометрический состав исследуемых почв измеряли методом лазерной дифракции размеров частиц на приборе Analysette 22 comfort с предварительной диспергацией водной почвенной суспензии ультразвуковой обработкой в течение 5 мин [10]. По гранулометрическому составу почвы по классификации Качинского характеризуются, как тяжелосуглинистые крупнопылеватые на лёссовидном суглинке, в соответствии с международной классификацией USDA, как пылеватый суглинок (silt loam).

Определение содержания общего углерода проводили методом сухого сжигания на анализаторе АН-7529М [10]. Полученные данные представлены в табл. 2. Наибольшим содержанием углерода характеризуются образцы некосимой степи, дубрашины и лесополосы. В почве длительного пара и пашни содержание углерода меньше почти в 2 раза.

Минералогический состав черноземов типичных представлен лабильными минералами на 46% и каолинитом с хлоритом на 31% [12].

Значения удельной поверхности определяли методом БЭТ по десорбции паров воды над солями [16]. Пахотные почвы обладают наименьшей удельной поверхностью, что, вероятно, связано с содержанием и свойствами органического вещества почв.

Основную гидрофизическую характеристику определяли методом равновесного центрифугирования [11].

Реологические параметры поведения почвенных образцов исследовали при разных влажностях: влажности максимального капиллярного водонасыщения и влажности предела текучести. Почвенные образцы предварительно растирали резиновым пестиком и просеивали через сито 0.25 мм, 3 г воздушно-сухой почвы помещали в небольшие цилиндры диаметром 2.5 см, соответствующие диаметру верхнего плато реометра. Образец выравнивали, слегка уплотняли и ставили на фильтровальную бумагу, концы которой опускали в дистиллированную воду для капиллярного водонасыщения в течение суток. Для испытаний образцов при влажности предела текучести воздушно-сухую растертую и просеянную через сито 0.25 мм почву доводили до влажности предела текучести добавлением воды и контролировали балансирным конусом Васильева [5]. Полученную пасту помещали в пластмассовую чашку Петри диаметром 3 см и оставляли в эксикаторе с насыщенными парами воды на сутки для структурообразования.

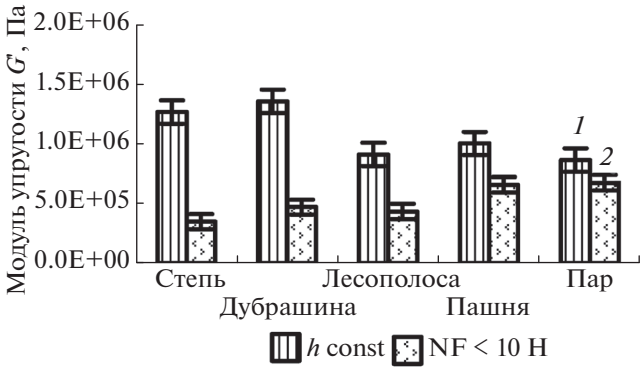

Рис. 5. Модуль упругости образцов в ненарушенной области (в области линейной вязкоупругости) при постоянной толщине образца (*1*, *h* = 3 мм) и при контроле нормальной силы (*2*, NF < 10 Н).

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

Испытания проводили при двух различных условиях: 1) заданной толщине образца 3 мм; 2) контроле нормальной силы <10 Н. В первом случае, чтобы достичь заданной толщины образца, прибор давил на образец с неконтролируемой силой, во втором случае был выставлен контроль нормальной силы <10 Н. Эксперименты проводили в трехкратной повторности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во время капиллярного водонасыщения образцы почв впитывали воду и набухали. Наибольшим набуханием отличались образцы с максимальным количеством органического вещества. Содержание общего углерода, физической глины, удельная поверхность, влажности максимального набухания (**МН**), предела текучести (**ПТ**) и величины набухания образцов показаны в табл. 2.

Влажность МН по кривым основной гидрофизической характеристики соответствует давлению почвенной влаги, близкому к 0, влажность предела текучести соответствует давлению 1.1 pF (примерно – 1300 Па). При давлении 0 влага заполнила все поры почвенного образца, при потенциале 1.1 pF влажность образцов приблизительно соответствует границе между свободным состоянием влаги и началом действия капиллярных сил [6].

Первым условием проведения испытаний была постоянная толщина образца 3 мм, она же расстояние между двумя плато. Чтобы достичь заданного расстояния, реометр создает усилия нормальной силы к образцу, находящемуся между двумя плато, сжимая его. Наибольшую силу прибору пришлось приложить к образцу некосимой степи – 22 Н, чтобы сжать его до толщины 3 мм и далее по убыванию для дубрашины – 12 Н, для лесополосы 10 Н, для пашни – 5 Н, для длительного пара – 4 Н. Данные величины нормального усилия находятся в тесной корреляции с величинами набухания, коэффициент корреляции составляет 0.92. Плотность же образов при одинаковой толщине получилась различная: чем больше набухание или содержание органического вещества (**ОВ**), тем большее усилие требуется реометру, чтобы сжать образец до заданной толщины, соответственно, тем больше будет конечная плотность образца и соответственно больше межчастичных контактов и модуль упругости. Таким образом, реологические параметры, определенные при заданной толщине испытуемого образца, заведомо становятся зависимы от плотности, а не от естественно возникших межчастичных взаимодействий в процессе капиллярного увлажнения. Поэтому воспользовались возможностью прибора устанавливать предел воздействия нормальной силы на образец и установили его <10 Н, при этом толщина образца колебалась от 2 до 4 мм. На рис. 5 показаны значения модулей упругости при двух условиях испытаний в области линейной вязкоупругости.

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

Исследования проводили в трехкратной повторности, для обсуждения представлены средние величины. Реологические параметры – диапазон линейной вязкоупругости, точку пересечения модулей $G' = G''$, величину интегральной зоны Z рассчитывали с помощью программного обеспечения реометра. Напомним, что диапазон линейной вязкоупругости – это область упругого поведения, область параллельного хода кривых модулей упругости G' и вязкости G''. Чем он выше и больше, тем лучше межчастичные взаимодействия. Точка пересечения модулей $G' = G''$ указывает величину деформаций, при которой деформационное поведение переходит от упруговязкого к вязкому. Величина интегральной зоны Z

указывает на суммарную величину областей упругого и упруговязкого поведения, и чем эта величина больше, тем прочнее межчастичные связи и устойчивее структура.

Как видно из рис. 6, прочность межчастичных связей в области линейной вязкоупругости при влажности ПТ больше прочности при влажности МН в 2–3 раза для всех вариантов образцов почвы. Очевидно, что при влажности МН почвенная паста содержит большое количество свободной влаги, поэтому частицы находятся на максимальном расстоянии друг от друга, и межчастичное сцепление слабое. Уменьшение содержания влаги в 1.5 раза (табл. 2), по-видимому, привело к возникновению капиллярных сил, которые и вызвали упрочнение межчастичного сцепления в 2–3 раза. Сравнение почв различных участков антропогенного использования показывает, что при обеих величинах влажности распределение по вариантам величин модулей упругости в начальный момент испытаний одинаково: наибольшим сцеплением обладают почвенные частицы длительного пара и пашни и далее по убывающей лесополоса, дубрашина, некосимая степь. Межчастичное взаимодействие образцов богатых ОВ меньше, чем в образцах с меньшим содержание ОВ. По-видимому, образцы, богатые ОВ, поглощают и удерживают больше влаги, которая препятствует установлению близких межчастичных связей, и в то же время выступает в роли смазки, позволяя частицам свободнее двигаться относительно друг друга.

Диапазон линейной вязкоупругости (рис. 7) или область упругого поведения при двух уровнях увлажнения различаются незначительно за исключением варианта пар. Дифференциация по вариантам более выражена при влажности МН, наибольший диапазон характерен для некосимой степи, наименьший – для длительного пара. Очевидна структурирующая роль органического вещества, большое его содержание в некосимой степи придает устойчивость к нагрузкам даже при максимальном водонасыщении. При влажности предела текучести, которая приблизительно в 1.5 раза меньше влажности МН, дифференциация по вариантам выражена не сильно, вероятно здесь вступают в действие капиллярные силы.

В точке пересечения модулей упругости и вязкости (рис. 8) величина деформации γ(%), при превышении которой почва переходит в вязкое состояние, в образцах с влажностью МН значительно больше, чем при влажности ПТ. При большей влажности поведение почв под нагрузкой более пластично, чем при влажности ПТ. При влажности предела текучести возникают более прочные межчастичные связи, но реологическое поведение почвенной пасты при этом становится более хрупким, разрушение связей наступает быстрее, чем при влажности максимального набухания, так как при влажности МН почвенные частицы имеют большую возможность двигаться относительно друг друга. Из всех вариантов наибольшей пластичностью или диапазоном вязкоупругой структуры обладают варианты с большим содержанием ОВ.

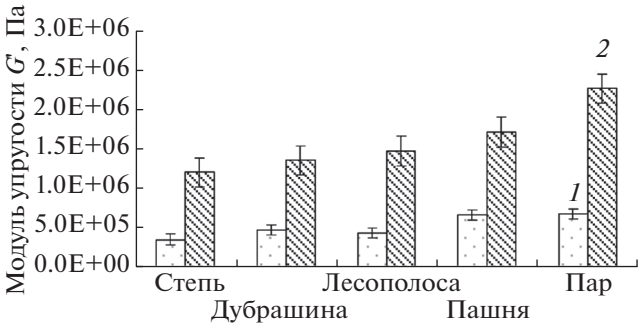

Рис. 6. Модули упругости в области линейной вязкоупругости при влажностях максимального набухания (*1*) и предела текучести (*2*).

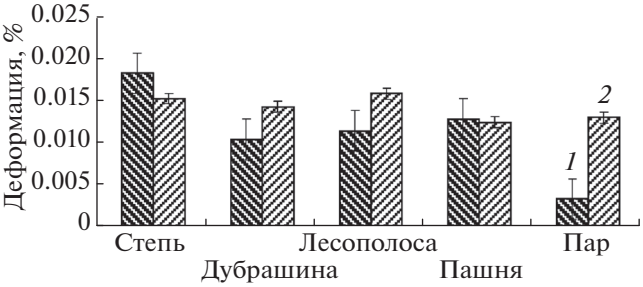

Рис. 7. Диапазон линейной вязкоупругости: *1* – максимальное набухание; *2* – предел тягучести.

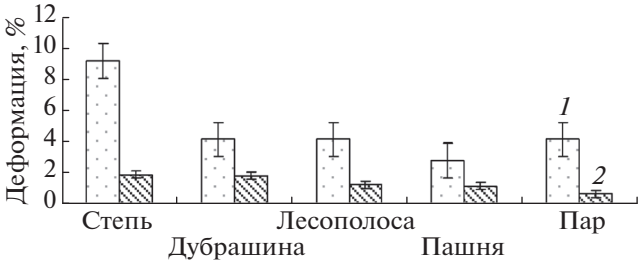

Рис. 8. Величина деформации при пересечении модулей $G' = G''$ (образец находится в пограничном состоянии между пластичным и вязким состоянием) при влажностях максимального набухания (*1*) и при влажности предела текучести (*2*).

Интегральной характеристикой вязкоупругого поведения может служить интегральная зона Z (рис. 9), площадь, ограниченная с одной стороны начальной величиной амплитуды сдвига, с другой стороны кривой коэффициента потерь до точки пересечения, равной 1. Интегральная зона Z соответствует суммарной величине областей упругого и упруговязкого поведения до перехода в область

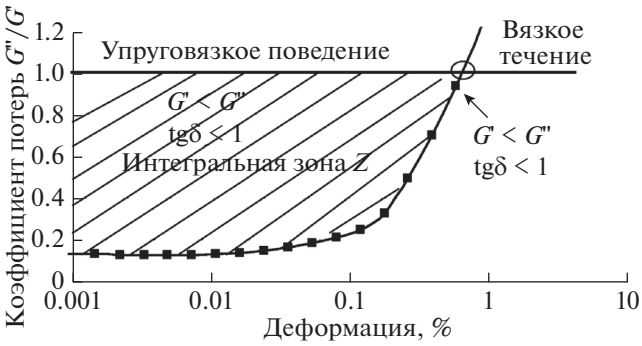

Рис. 9. Интегральная зона *Z* пахотного чернозема при длительном нахождении под паром.

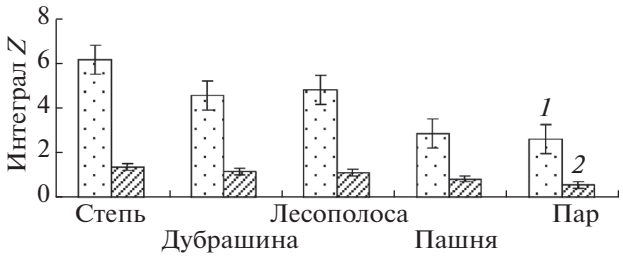

Рис. 10. Величины интегральной зоны *Z* при двух уровнях увлажнения: *1* – максимальное набухание; *2* – предел тягучести.

вязкого течения. Чем больше значение интеграла *Z*, тем больше упруговязкое состояние почвы.

Как видно из рис. 9, величины интегральной зоны *Z* при двух уровнях увлажнения сильно различаются. При влажности максимального набухания или давлении почвенной влаги, близком к 0, эта область довольно велика и распределяется по вариантам следующим образом: некосимая степь > > дубрашина = лесополоса > пашня > длительный пар. При влажности предела текучести или давлении почвенной влаги –1300 Па зона вязкоупругого поведения значительно меньше. Вероятно, из-за возникших капиллярных связей диапазон смещения почвенных частиц относительно друг друга резко сократился. При этом распределение величин зоны *Z* по вариантам полностью соответствует распределению при влажности МН, и в целом определяется содержанием ОВ. Отсюда можно заключить, что ОВ способствует увеличению диапазона вязкоупругого поведения почв.

Таким образом, реологическое поведение почв в значительной степени определяется содержанием органического вещества, которое может играть как роль связующего, структурирующего межчастичные связи агента при большой влажности и выполнять противоэрозионную функцию, так и роль смазки, которая препятствует установлению прочных межчастичных связей минеральной части почв, чем обеспечивает благоприятное агрегатное строение, не позволяя минеральным частицам цементироваться в глыбы. Образцы, богатые ОВ (целина, дубрашина, лесополоса), обладают более пластичным поведением и большей устойчивостью к нагрузкам. Образцы с меньшим содержанием ОВ (длительный пар, пашня) отличались более жестким межчастичным сцеплением и меньшим диапазоном устойчивости к нагрузкам. Почвенные пасты при влажности предела текучести характеризуются большей прочностью межчастичного сцепления и хрупким поведением, чем при влажности максимального набухания.

ВЫВОДЫ

1. Сравнение реологических параметров поведения почвенных паст черноземов типичных из различных условий землепользования определенных методом амплитудной развертки на модульном реометре MCR-302 показало, что участки почвы, не подвергающиеся антропогенному вмешательству (целина, дубовый лес, лесополоса), обладают большей устойчивостью к действию нагрузок. Почвы данных участков характеризуются повышенной устойчивостью к нагрузкам, вероятно, вследствие структурирующего эффекта ОВ (при прочих относительно равных свойствах), что подтверждается работами многих исследователей [17, 18, 22, 24].

2. Реологические свойства почвы под лесополосой значительно отличаются от свойств пашни, приближаясь к значениям близким целинным участкам, что свидетельствует о восстановлении структурной организации почвенных частиц в условиях произрастания лесополос.

3. Реологическое поведение почвенных паст находится в тесной зависимости от влажности. В условиях большой влажности (МН) реологическое поведение почв в значительной степени определяется содержанием органического вещества, которое играет как роль связующего, структурирующего межчастичные связи агента, тем самым повышая устойчивость (водоустойчивость в насыщенном состоянии) и выполняя противоэрозионные функции, препятствуя переходу почвы в текучее состояние.

С уменьшением влажности прочность структурных связей резко возрастает, диапазон вязкоупругого состояния сокращается. Почвенные пасты при меньшей влажности (при пределе текучести) характеризуются большей прочностью межчастичного сцепления и хрупким поведением, чем при влажности МН. ОВ при этом выполняет роль смазки, которая препятствует установлению прочных межчастичных связей минеральной части почв, чем обеспечивает благоприятное

агрегатное строение, не позволяя минеральным частицам цементироваться в глыбы.

4. Методические аспекты проведения испытаний на почвенных пастах при постоянной величине толщины образца и контроле нормальной силы давления на образец заключаются в том, что для набухающих образцов предпочтительнее проводить испытания при контроле нормальной силы.

ОВ черноземов в исследованных условиях определяет образование и устойчивость межчастичных связей. Характеристику межчастичных связей в диапазоне влажностей от влажности ПТ до МН можно исследоватнть методом амплитудной развертки в осцилляционном режиме с измерительной системой параллельных плато на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия). С помощью данного метода можно получить ряд количественных характеристик реологического поведения почвенных образцов, таких как диапазон упругого поведения или устойчивого состояния структуры почв по мере увеличения нагрузки, область переходного состояния или пластичного поведения от упругого до вязкого. Также данный метод позволяет получить количественную характеристику в единицах давления (Па) величины межчастичного взаимодействия на каждом этапе реологической кривой.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 14-16-00065 – 50% и РФФИ, проект № 14-04-01683 – 25%, № 16-04-01111-25%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрукова Л.П.* Изучение тиксотропных свойств почв с помощью ротационного вискозиметра // Почвоведение. 1970. № 8. С. 104–114.
2. *Абрукова В.В., Манучаров А.С.* Реологическая характеристика поверхностно-глеевой почвы // Почвоведение. 1986. № 9. С. 44–52.
3. *Афанасьева Е.А.* Черноземы Среднерусской возвышенности. М.: Наука, 1966. 200 с.
4. *Базыкина Г.С.* Многолетняя динамика элементов водного баланса типичных черноземов заповедной степи (Курская обл.) // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1468–1478.
5. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1973. С. 398.
6. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 202 с.
7. *Горькова И.М.* Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 152 с.
8. *Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О.* Матричная организация почв. М.: Русаки, 2001. 296 с.
9. *Манучаров А.С.* К использованию реологических исследований в почвоведении // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1983. № 3. С. 56–40.
10. *Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Початкова Т.Н., Тюгай З.* Практикум по физике твердой фазы почв. М.: Гриф и К, 2011. 63 с.
11. *Смагин А.В.* Колоночно-центрифужный метод определения основной гидрофизической характеристики почв и дисперсных грунтов // Почвоведение. 2012. № 4. С. 470–477.
12. *Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И.* Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, 2005. 335 с.
13. *Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Честнова В.В.* Оценка реологическими методами восстановления структуры почв под влиянием выращивания лесополос на антропогенно-нарушенных почвах // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2014. № 6. С. 53–57.
14. *Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А.* Прочность структурных связей в почвенных пастах и агрегатах в зависимости от влажности // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1330–1335.
15. *Хайдапова Д.Д., Холопов Ю.В., Забоева И.В., Лаптева Е.М.* Реологические особенности коагуляционной структуры Северотаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв Европейского Северо-Востока // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2014. № 1. С. 20–25.
16. *Шеин Е.В., Архангельская Т.А., Гончаров В.М., Губер А.К., Початкова Т.А., Сидорова М.А., Смагин А.В., Умарова А.Б.* Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 200 с.
17. *Шеин Е.В., Лазарев В.И., Айдиев А.Ю., Туангсуанг Сакункончак, Кузнецов М.Я., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д.* Изменение физических свойств черноземов типичных (Курская обл.) в условиях длительного стационарного опыта // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1201–1208.
18. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д.* Устойчивость почвенной структуры и органическое вещество почв // Роль почв в биосфере. Тр. ин-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова и РАН. 2002. Вып. 1. С. 129–151.
19. *Шеин Е.В., Болотов А.Г., Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н.* Реологические свойства черноземов Алтайского Приобья // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2014. № 8. С. 32–38.
20. *Шрамм Г.* Основы практической реологии и реометрии / Под ред. В.Г. Куличихина. М.: Колос, 2003. 311 с.
21. *Khaydapova D., Milanovskiy E.Yu., Shein E.V.* Impact of antropogenic load on rheological properties of typical chernozems (Kursk region, Russia) // Soil Degradation Advances in Geoecology. Catena, 2013. P. 62–71.
22. *Markgraf W., Horn R., Peth S.* An approach to rheometry in soil mechanics–Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil Tillage Res. 2006. V. 91. P. 1–14.
23. *Markgraf W., Moreno F., Horn R.* Quantification of microstructural changes in salorthidic fluvaquents using rheological and particle charge techniques // Vadose Zone J.V. 11(1). dx.doi.org/vzj/ 11/1/vzj2011.0061
24. *Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R.* Influence of organic matter on rheological properties of soil // Appl. Clay Sci. 2012. V. 64. P. 25–33.
25. *Mezger T.G.* The Rheology handbook. Hanover, Germany, 2011. 436 p.