УДК:631.43 DOI: 10.25695/AGRPH.2024.02.01

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ МЕТОДОМ АМПЛИТУДНОЙ РАЗВЕРТКИ НА ПРИМЕРЕ ТИПИЧНОЙ ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

Ю. В. Холопов[1], Д. Д. Хайдапова[2], Л. И. Аракелова[2], Е. М. Лаптева[1], А. Б. Умарова[2]

[1]Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28;
[2]Факультет почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,
E-mail: yuraholopov@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.06.2024, принята к печати 25.06.2024

Проведен сравнительный анализ результатов реологических исследований образцов почв методом амплитудной развертки (amplitude sweep test – AST) на модульном реометре MCR 302 (Anton Paar, Австрия). Объектом исследований послужила подзолистая с микропрофилем подзола супесчано-/тяжелосуглинистая почва на покровном суглинке (Folic Albic Retisol (Abruptic, Loamic, Protospodic)) – почва средней тайги (Республика Коми, окрестности г. Сыктывкара). Реологические параметры определялись на образцах нарушенного (растертые и просеянные через сито) и ненарушенного (монолиты) сложения в состоянии капиллярного увлажнения. Это позволило выявить схожий характер реологического поведения и определить специфику отдельных генетических горизонтов. Наиболее устойчив к механическим нагрузкам верхний органогенный горизонт – лесная подстилка (О). Переходный горизонт BEL характеризуется жесткой, но наименее устойчивой структурой с узким диапазоном деформационных возможностей. Ненарушенные образцы имеют прочные и жесткие структурные связи в области вязкоупругого поведения, что обусловлено плотной упаковкой и многоуровневым взаимодействием почвенных частиц, микроагрегированностью и присутствием фрагментов корней. Повышенная жесткость сложения монолитов сочетается с хрупкостью их структуры. Нарушенные образцы при нагрузке характеризовались большей пластичностью по сравнению с монолитами, что обусловлено разрушением агрегатов в процессе растирки и образованием большого количества межчастичных контактов.

Ключевые слова: реология, структура, деформация, подзолистая почва, Folic Albic Retisol, почвенные монолиты.

METHODOLOGICAL FEATURES OF DETERMINING RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS BY AMPLITUDE SWEEP METHOD FOR TYPICAL PODZOLIC SOIL

Yu. V. Kholopov[1], D. D. Khaidapova[2], L. I. Arakelova[2], E. M. Lapteva[1], A. B. Umarova[2]

[1]Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 167982 Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28;
[2]Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, p. 12, Moscow, 119991 Russia
E-mail: yuraholopov@yandex.ru

A comparative analysis of soil rheological properties with the amplitude sweep test (AST) method on a modular rheometer MCR 302 (Anton Paar, Austria) was carried out. The object of the research was a podzolic soil with a podzole sandy loam/heavy loam soil microprofile on a cover loam (Folic Albic Retisol (Abruptic, Loamic, Protospodic)) – the soil of the middle taiga (Komi Republic, the vicinity of Syktyvkar). Rheological parameters were determined in disturbed (ground and sieved through a sieve) and undisturbed (monoliths) soil samples addition at the capillary moisture content, which showed a similar nature of rheological behavior and revealed the specifics of individual genetic horizons. The upper organogenic horizon was the forest floor (O), which was the most resistant to the mechanical loads. The BEL transition horizon was characterized by a rigid but least stable structure with a narrow range of deformation possibilities. Undisturbed samples had strong and rigid structural bonds in the field of viscoelastic behavior, which was due to the dense packing and multilevel interaction of the soil particles, micro-aggregate soil composition and the presence of root fragments. The increased rigidity of the monoliths was combined with the fragility of their structure. The disturbed samples under the load showed more plastic properties compared to the monoliths, which was due to the disintegration of the soil aggregates during grinding and the formation of a large number of inter-particle contacts.

Keywords: rheology, structure, deformation, podzolic soil, Folic Albic Retisol, soil monoliths

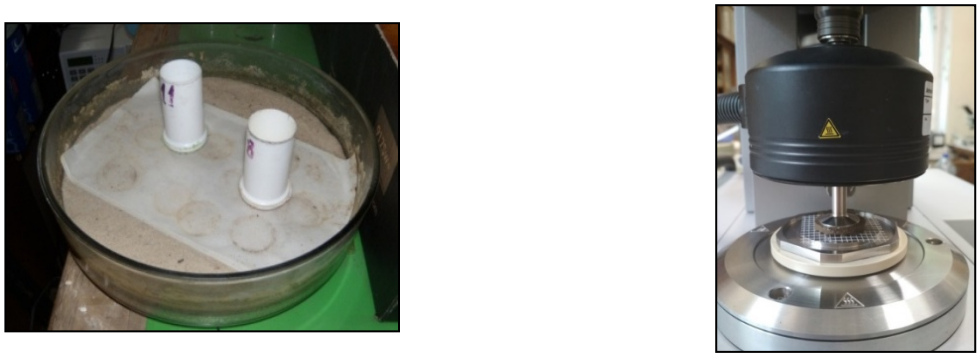
ВВЕДЕНИЕ

В реологических исследованиях процессов деформации и текучести материалов (Рейнер, 1965) традиционно используется различное оборудование: реометры, вискозиметры, пластометры. В последние десятилетия в реологии появился целый спектр специальных высокоточных приборов – реометров, позволяющих детально исследовать поведение дисперсных тел, в том числе почв. Например, применяемый в реометрах серии MCR «Anton Paar» метод амплитудной развертки (или колебательный метод) рекомендован многими специалистами для выполнения реологических исследований почв (Horn, Smucker, 2005; Markgraf et al., 2006; Шеин и др., 2015; Pertile et al., 2016; Хайдапова и др., 2016). Преимущества данного метода: (1) для анализа требуется небольшой образец (масса 3–5 г), что позволяет исследовать как нарушенные пробы почв (растертые и просеянные через сито), так и ненарушенные (монолиты с ненарушенным сложением); (2) контроль температуры, что существенно повышает точность получаемых данных и расширяет спектр исследовательских возможностей. Однако данный метод требует некоторой доработки и унификации с методическими подходами, используемыми разными исследователями при подготовке почвенных образцов и исследовании их реологического поведения (Холопов и др., 2018). В частности, D. Holthusen с соавторами (2019), В. В. Клюева, Д. Д. Хайдапова (2017) для анализа прочности почвенной структуры рекомендуют использовать два варианта проб: (1) растертые гомогенизированные образцы почв; (2) пробы почв с ненарушенным сложением (монолиты). В связи с повышенной плотностью и прочностью почвенных монолитов многие зарубежные исследователи (Teamrat et al., 2001; Holthusen et al., 2017; Pértile et al., 2018) для предотвращения скольжения плоского измерительного плато по поверхности почвенной пробы используют специальные ребристые плато или материалы с шершавой поверхностью, располагая их на параллельных измерительных плоскостях прибора. Отмеченные различия в пробоподготовке и исследовании реологического поведения почвенных образцов обуславливают необходимость проведения специальных методических исследований с использованием двух вариантов образцов почв (растертых проб и монолитов) и двух вариантов измерительных плоскостей (гладких и шершавых). Таким образом, целью настоящей работы стала оценка результатов реологических испытаний образцов среднетаежной подзолистой почвы в нарушенном (растертые и просеянные) и ненарушенном (монолиты) виде во взаимосвязи с их физико-химическими свойствами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования послужила подзолистая с микропрофилем подзола супесчано-/тяжелосуглинистая почва, сформированная на покровном суглинке (Folic Albic Retisol) (Классификация…, 2004; World reference..., 2015). Разрез заложен в подзоне средней тайги, в ельнике чернично-зеленомошном, в 6 км западнее г. Сыктывкара. Координаты участка исследований: 61°39" с. ш, 50°41" в. д.; абсолютная высота – 150 м над ур. м. Климат района исследований умеренно холодный (умеренно континентальный) (Атлас Республики Коми..., 1997).

Физико-химические свойства почв исследованы стандартными методами (Теория и практика химического…, 2006). Реологические исследования образцов почв выполнялись при помощи модульного реометра MCR-302 «Anton Paar» (Австрия) методом амплитудной развертки (колебательный метод) с измерительными системами «плато – плато» (Markgraf et al., 2012; Шеин и др., 2014; Хайдапова и др., 2016; Stoppe, Horn, 2018). Анализировались образцы подзолистых почв в нарушенном (растертые) и ненарушенном (монолиты) виде. Монолиты вырезались в полевых условиях из генетических горизонтов с помощью пластиковых колец высотой 1 см и диаметром 2,5 см. Нарушенные пробы почв изготавливались из образцов почв, высушенных, растертых и просеянных через сито с диаметром ячеек 1 мм. Масса образца – 3 г, перед исследованием образцы почв доводились до состояния максимального насыщения влагой в течение 24 ч. Для исключения скольжения образца по измерительной поверхности на верхнее и нижнее измерительные плато прибора приклеивалась сетчатая серпянка (рис. 1).



A B

Рис. 1. Этапы подготовки образца почвы к съемке реологической кривой почв на Реометре MCR-302:
A – суточное увлажнение проб до влажности максимального насыщения;
B – почвенная проба, установленная на сетчатую серпянку на измерительном плато прибора

Подготовленный образец почвы загружался в прибор, при этом он помещался между измерительными пластинами. Верхняя пластина подвергала почвенный образец колебательным нагрузкам с постоянной частотой и увеличивающейся амплитудой. В каждом образце после проведения реологического испытания определялась влажность весовым способом (температура высушивания – 105°С). Испытания проводились при контроле нормальной силы $< 10H$. Технические режимы испытаний: расстояние между плато $h \sim 1$–5 мм, диаметр плато – 2,5 см, деформация сдвига γ – 0,001–100%, угловая частота f – 0,5 Гц, количество измеряемых точек – 30, температура образца поддерживалась элементами Пельтье на постоянном уровне 20°С. В ходе проведенных испытаний были определены следующие параметры, характеризующие реологические свойства почв:

– модуль накопления (G', МПа) – является мерой энергии деформации, сохраненной образцом в процессе сдвига (значения модуля запаса G' в начале деформационного сдвига использованы для характеристики жесткости межчастичных почвенных контактов);

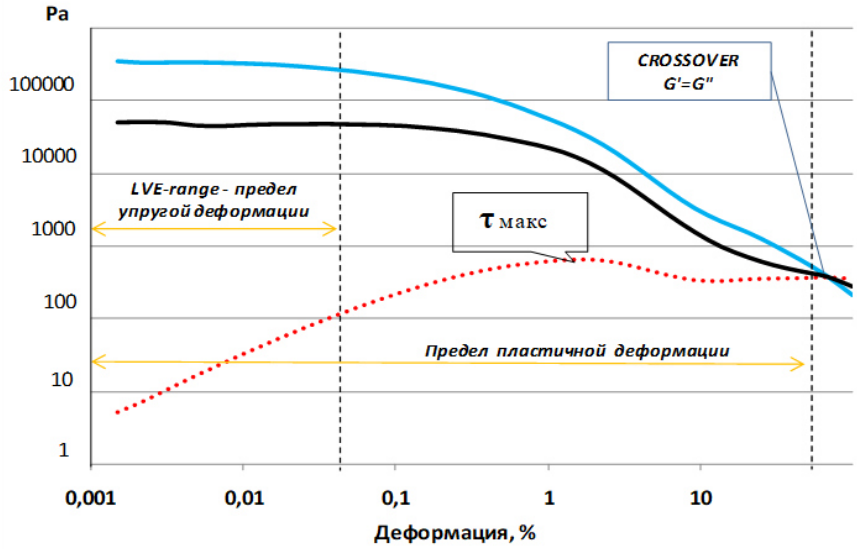
– модуль потерь (G'', МПа) – является мерой энергии деформации, израсходованной во время процесса сдвига и потерянной образцом. Модули G' и G'' являются составной частью комплексного модуля сдвига G^*, модуль G' характеризует упругую составляющую поведения вязкоупругого материала;

– линейный диапазон вязкоупругого поведения (LVE-range, %) – отражает область с постоянными величинами или с незначительными изменениями модуля запаса G';

– максимальное напряжения сдвига ($\tau_{макс}$) – характеризует прочность или общую устойчивость структуры почвы к деформационной нагрузке (Holthusen et al., 2019);

– диапазон пластичной деформации (Crossover, %) – определяется по точке пересечения модулей запаса и потерь ($G' = G''$), фиксирует полное разрушение структурных связей с переходом системы из состояния гель в золь или из твердообразного в текучее (рис. 2).

Статистическая обработка данных проводилась в программном пакете Excel.



модуль накопления G′; модуль потерь G″; максимальное напряжение сдвига $\tau_{макс}$

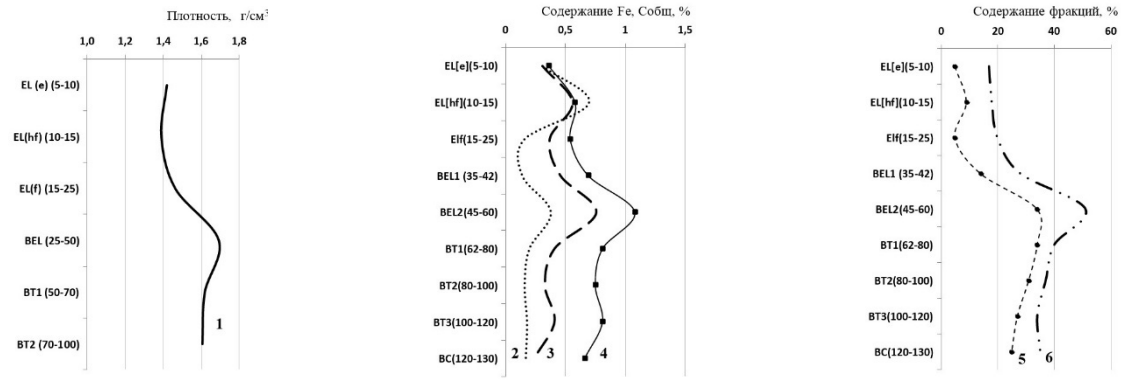
Рис. 2. Кривые зависимости модуля накопления (G′), модуля потерь (G″) и максимального напряжения сдвига ($\tau_{макс}$) от величины деформации (%)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Специфической особенностью морфологического строения рассматриваемой почвы является сочетание элювиального облегченного горизонта EL, характеризующегося наличием микропрофиля подзола EL(e)–EL(hf), с более тяжелым и плотным текстурным горизонтом BT. Горизонт BT в средней части профиля имеет хорошо выраженную призматическую структуру с глинистыми натеками на поверхности педов и кремнеземистой присыпкой. Физико-химические свойства таких почв подробно рассмотрены в ранее опубликованных материалах (Забоева, 1975; Атлас почв…, 2010; Холопов и др., 2018). Для исследованной почвы характерны: повышенная кислотность (3,8–4,0 ед. pH), выщелоченность элювиальной части профиля, низкое содержание гумуса в минеральной части профиля с преобладанием в его составе фульвокислот и отсутствием фракций гуминовых кислот, связанных с кальцием (Структурно-функциональная организация…, 2001). Гумусовые вещества отличаются агрессивностью по отношению к минералам и подвижностью в профиле. Высокое содержание в фульвокислотах карбоксильных групп (до 21%) обуславливает способность образовывать комплексные соединения с катионами железа, алюминия и других металлов, переводя их в растворимое состояние (Путеводитель…, 2002; Шамрикова, 2013) Как следствие, образующиеся при разложении лесной подстилки различные высоко- и низкомолекулярные органические кислоты, просачиваясь в минеральную толщу почвы, активно

взаимодействуют с железосодержащими минералами с формированием алюмо- и железо-гумусовых соединений (рис. 3В).

Сравнение данных, полученных при исследовании растертых почв, традиционно используемых в почвенной реологии, и монолитов, показало, что пробы ненарушенного сложения (монолиты) характеризуются большей жесткостью и прочностью структуры по сравнению с растертыми пробами. Превышение значений может составлять более чем в два раза, что согласуется с полученными ранее данными (Клюева, Хайдапова…, 2017, Holthusen et al., 2019). Это обусловлено меньшим содержанием влаги в образце, более плотным и многоуровневым взаимодействием частиц и микроагрегатов в монолитах и отсутствием данных связей в растертых образцах. Кроме того, определенный вклад вносят мелкие корни растений, пронизывающие почву и создающие прочный внутренний каркас в монолитах (пробах ненарушенного сложения). Исключением является верхний горизонт микропрофиля подзола EL(e), где низкие значения модуля накопления (G') (рис. 4А) указывают на слабые межчастичные взаимосвязи. Последнее, вероятно, обусловлено легким гранулометрическим составом (супесь) данного горизонта и относительно слабыми контактами между частицами, зависящими преимущественно от площади контакта. В переходном BEL (25–50 см) горизонте отмечен максимальный уровень жесткости с высокими значениям G', что сопряжено с накоплением здесь органо-минеральных соединений железа. Последнее установлено по данным о распределении в профиле соединений железа, извлекаемых вытяжками Тамма и Джексона (рис. 3В) (Холопов и др., 2018). Текстурный горизонт BT (50–120 см) служит водоупором для нисходящих потоков влаги и растворенных органических и органо-минеральных соединений. В связи с этим в вышележащем горизонте BEL наблюдаются временный застой влаги и переувлажнение горизонта. В таких условиях органо-минеральные соединения обволакивают частицы почвы, создавая жесткие микроструктурные соединения. В то же время в горизонте BEL отмечены наименьшие значения максимального напряжения сдвига ($\tau_{макс}$), свидетельствующие о хрупкости и слабой устойчивости структуры почвы к деформациям.



A B C

Рис. 3. Профильное распределение некоторых физических (A, C) и химических (B) параметров в исследуемой почве: 1 – плотность почвы (ρ, г см$^{-3}$); 2 – содержание общего углерода ($C_{общ}$, %); 3 – оксалатрастворимых форм Fe_2O_3 (по Тамму, %); 4 – дитионитрастворимых форм Fe_2O_3 (по Джексону, %); 5 – илистых частиц (<0,001 мм, %); 6 – частиц физической глины (<0,01 мм, %);

A B

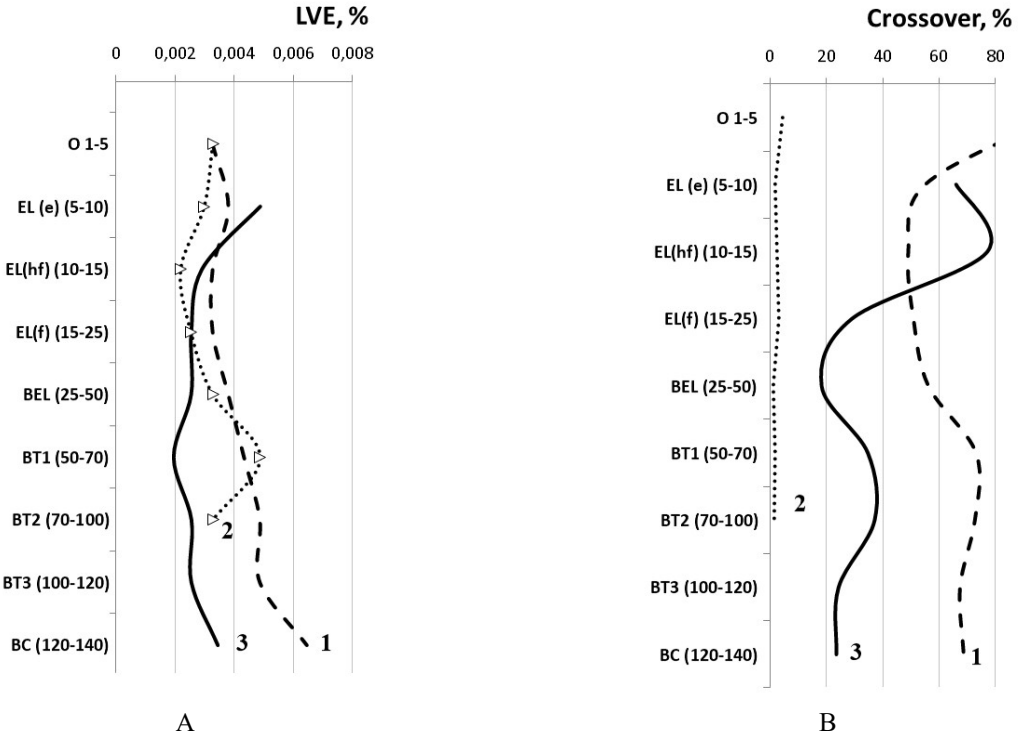
Рис. 4. Профильное изменение модуля накопления (A; G′, Pa) и максимального напряжения сдвига (B; $\tau_{макс}$, Pa) в подзолистой почве средней тайги: 1 – нарушенные пробы (растертые образцы почв), исследование которых проводили с накладыванием сетки на измерительные плато; 2 – нарушенные пробы (растертые образцы почв), исследование которых проводили без накладывания сетки на измерительные плато; 3 – ненарушенные пробы (монолиты)

У монолитов из горизонтов BT–BC показатели жесткости (G') и максимального напряжения сдвига ($\tau_{макс}$) также несколько выше по сравнению с нарушенными образцами почв, что указывает на более высокую прочность контактов в монолитах. Жесткость и прочность структуры монолитов из иллювиальных горизонтов обусловлены меньшим содержанием в них влаги, а также более плотным и многоуровневым взаимодействием частиц и микроагрегатов. Образцы почв, исследованные в растертом (нарушенном) состоянии, благодаря тяжелому гранулометрическому составу (рис. 3C) обладают большей удельной поверхностью и, соответственно, более высокой гидрофильностью. Присутствие влаги увеличивает расстояние между почвенными частицами, ослабляя тем самым жесткость межчастичного взаимодействия.

Для подзолистого горизонта EL(e) значения G', полученные при исследовании растертых проб, являются наиболее высокими в профиле подзолистой почвы и близкими к показателям G', характерным для проб ненарушенного сложения (монолиты). Растирание и гомогенизация образца почвы из подзолистого горизонта в наименьшей степени повлияли на его реологические показатели по сравнению с другими генетическими горизонтами почвы, их значения определяются формой частиц и площадью контактов между частицами.

В горизонте EL(f) и в переходном горизонте BEL (25–50 см) (рис. 4A) показатели G' у нарушенных образцов ниже, чем у монолитов, что, вероятно, обусловлено разрушением при пробоподготовке микроагрегатов, сформированных на основе органо-минеральных соединений альфегумусовой природы (Stoppe, Horn, 2018).

Напротив, показатели предела упругости (LVE, %) и пластичности (CROSSOVER, %) (рис. 5A, B) у растертых образцов почти в два раза превосходят величины, полученные при исследовании монолитов. Это также обусловлено большей гидратированностью частиц почвы в результате увеличения удельной поверхности при разрушении микро- и макроагрегатов в процессе пробоподготовки образцов (Markgraf et al., 2009; Cho et al., 2006; Ghezzehei and Or, 2001; Reichert et al., 2010). Структура становится более подвижной и пластичной, что отражается на реологических показателях. Разнообразие порового пространства в монолитах, присутствие в порах защемленного и адсорбированного воздуха определяют более низкую скорость насыщения и меньшее содержание влаги в образцах почв с ненарушенным сложением. Влажность монолитов, как правило, на 5–15% меньше аналогичных показателей, характерных для проб почв с нарушенным сложением, что обуславливает высокую жесткость (G') структурных взаимосвязей в монолитах с хрупкими и слабоупругими свойствами. Батисто с соавторами (Batistao et al., 2020) рекомендуют при использовании для реологических исследований растертых образцов почв предварительно уплотнять их для получения наиболее корректных результатов, близких к значениям, характерным для естественных почв. Однако такой подход может привести к более значительному разнообразию укладки почвенных частиц при уплотнении, особенно во влажном состоянии, и, соответственно, трудностям в интерпретации результатов. Для решения данных вопросов требуется проведение дополнительных исследований с использованием образцов почв разного генезиса и с различным начальным уровнем увлажнения.



A B

Рис. 5. Профильное изменение диапазона линейной вязкоупругости (A; LVE, %) и предела текучести (B; CROSSOVER, %) в подзолистой почве средней тайги. Условные обозначения те же, что на рис. 4

Одним из методических вопросов, возникающих при изучении реологического поведения почв методом амплитудной развертки, является взаимодействие гладкой измерительной поверхности прибора с почвенным образцом. Многие исследователи используют специальные шероховатые плато или материалы-прокладки (сетки) для лучшего закрепления дисперсной пробы и избежания скольжения по поверхности (Ghezzehei and Or, 2001; Holthusen et al., 2019). Съемка образцов с сеткой на измерительном конусе и без нее показала, что характерной особенностью реологического поведения насыпных проб без сетки является их низкий диапазон пластичности CROSSOVER по всему профилю исследованной почвы (рис. 5С). Низкие значения предела пластичности, возможно, связаны с тем, что при увеличении шероховатости измерительных плоскостей повышается доля вовлеченной в деформационные процессы пробы. Без сетки деформационное воздействие затрагивает меньшее количество образца (меньшую его толщу), в таких условиях возможно скольжение плоскости прибора по поверхности образца почвы и, соответственно, снижение адгезии. Следует отметить нарастающий характер данного явления – при начальных небольших колебаниях измерительной плоскости прибора влияние дополнительной сетки на значения реологических параметров несущественное, разница в величинах прочности (G') и предела упругости (LVE) незначительна. Однако при высоких оборотах (особенно для монолитов) значимость скольжения верхнего плато по образцу велика, что проявляется в очень низких величинах диапазона пластичности (CROSSOVER).

Статистический анализ показал (табл.), что в монолитах жесткость контактов тесно связана с содержанием углерода и альфегумусовых соединений. Величины максимального напряжения сдвига ($\tau_{макс}$) связаны с содержанием фракций глины и ила. Аналогичная корреляция выявлена с фактором структурности по Вадюниной и с коэффициентом полидисперсности, так они связаны с динамикой глинистой фракции. Значения упругости и пластичности в монолитах тесно связаны с содержанием углерода. В растертых пробах на величину жесткости контактов влияет содержание глинистых частиц, обменных оснований и углерода. Причем, в отличие от монолитов, корреляция с параметром модуля накопления обратная, т. е. высокое содержание глинистых частиц снижает жесткость связей. Величины диапазона упругости и пластичности положительно коррелируют с содержанием глинистых частиц и обменных оснований в нарушенных пробах.

Таблица. Коэффициенты корреляции Пирсона (R)* между реологическими параметрами и физико-химическими свойствами автоморфной среднетаежной подзолистой почвы

Параметр	Ненарушенный образец (монолит)				Нарушенный образец (растертая проба)			
	G', Па	LVE-range,	Cross-over, %	τ_{max}, Па	G', а	LVE-range, %	Cross-over, %	τ_{max}, Па
pH_{KCl}	0,15	0,01	0,13	0,18	**–0,81***	0,10	0,10	0,13
Сумма обменных оснований, ∑Ca+Mg[a], смоль кг$^{-1}$	–0,55	0,36	0,29	**0,72***	**–0,87***	0,32	**0,94***	0,10
$C_{орг}$, %	**–0,8***	**0,79***	**0,95***	0,30	–0,44	0,48	0,39	**0,8***
$C_{общ}$, %	0,45	0,4	**0,80***	0,38	0,36	0,2	0,35	0,10
C/N	0,26	**0,7***	**0,80***	0,33	**0,71***	0,25	0,31	**0,72***
Fe_2O_3 по Тамму, %	**0,77***	0,18	0,33	0,3	0,60	0,19	0,10	0,13
Плотность почвы, ρ, г см$^{-3}$	0,40	0,30	0,20	**0,77***	0,10	0,30	0,39	0,25
Фактор структурности по А.Ф. Вадюниной, V, % **	0,51	0,25	0,22	**0,77***	0,18	0,18	**0,81***	0,10
Коэффициент полидисперсности, P, %***	0,50	0,18	0,13	**0,75***	**–0,74***	0,25	**0,92***	0,18
Сумма частиц, % <0,01 мм	0,53	0,15	0,37	**0,79***	**–0,76***	0,3	0,4	0,12
Сумма частиц, % <0,001 мм	0,59	0,18	0,40	**0,75***	**–0,72***	0,28	**0,92***	0,12

Примечание:
* – объем выборки n = 8; уровень значимости p<0,05;
** – фактор структурности по А. Ф. Вадюниной V=(A+B/C)·100%, где А – количество ила в % (частицы диаметром <0,001 мм), В – количество мелкой пыли в % (частицы диаметром 0,005–0,001 мм), С – суммарное содержание крупной и средней пыли (частицы диаметром 0,05–0,01 мм и 0,01–0,005 мм);
*** – коэффициент полидисперсности P=A/D·100%, где А –количество ила в % (частицы диаметром <0,001 мм), С – количество песка в % (частицы диаметром >0,01 мм).

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, почвенный профиль исследованной подзолистой с микропрофилем подзола почвы оказался весьма дифференцированным в отношении деформационных воздействий. Наиболее устойчив к механическим нагрузкам верхний органогенный горизонт (О), для которого характерны высокие значения показателя упругости, свидетельствующие об устойчивости данного горизонта к более высоким механическим нагрузкам в сравнении с нижележащими минеральными горизонтами. Переходный горизонт BEL отличается очень жесткой, но менее устойчивой структурой с узким диапазоном деформационных возможностей. Иллювиальные горизонты BT характеризуются пластичностью и прочностью.

2. Изменение реологических показателей в профиле почвы у образцов почв нарушенного сложения (растертые и гомогенизированные пробы) является более плавным между горизонтами – без резких скачкообразных форм кривых. Различия в абсолютных значениях реологических показателей, характерных для образцов нарушенного (растертые пробы) и ненарушенного (монолиты) сложения, зависят от физических свойств почвенного горизонта и могут быть более чем в два раза выше у оструктуренных горизонтов тяжелого гранулометрического состава.

3. Реологические свойства растертых образов определяются преимущественно формой частиц и площадью контактов между ними, а монолитов – содержанием органо-минеральных альфегумусовых соединений, корней, мелких камней, уплотненностью и более низкими значениями влажности капиллярного насыщения. Параллельное изучение реологических свойств образцов нарушенного и ненарушенного сложения весьма перспективно, т. к. реологические кривые, полученные для монолитов, и расчет на их основе реологических показателей дают возможность выявить специфику генетических горизонтов, оценить их связь с физическими и химическими свойствами почв и охарактеризовать устойчивость почв к внешним нагрузкам. Сложность использования монолитов при проведении подобного рода исследований связана с их слабой и медленной смачиваемостью, присутствием в образце различных включений, а также с необходимостью увеличения повторностей вследствие значительного разнообразия и неоднородности пространственного сложения природных почв.

4. Создание шероховатой поверхности с помощью специальной сетки, помещенной на измерительное плато прибора и взаимодействующей с почвенным образцом, позволило выявить различия в величинах предела пластичности при высоких напряжениях. Это свидетельствует о потере адгезии при скольжении гладкой поверхности прибора по почвенному образцу при высоких деформационных нагрузках. Создание мелкоячеистого рельефа измерительной поверхности, вероятно, приводит к вовлечению в деформационные изменения более значительного количества почвенного образца и соответствующему увеличению значений предела пластичности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Криогенез как фактор формирования и эволюции почв бореальных и арктических экосистем европейского Северо-Востока в условиях антропогенных воздействий, глобальных и современных региональных климатических трендов» (регистрационный номер: 122040600023-8).

Список литературы

Братцев А.А., Братцев А.П. и др. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / отв. ред. А. И. Таскаев. М.: Дрофа; Дик, 1997. 115 с.

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

Добровольский Г.В., Таскаев А.И., Забоева И.В. Атлас почв Республики Коми. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2010. 356 с.

Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное издательство, 1975. 344 с.

Забоева И.В., Лаптева Е.М., Безносиков В.А. и др. Путеводитель научной почвенной экскурсии. Лесная зона (сезонно-промерзающие почвы) / отв. ред. И. В. Забоева. Сыктывкар.: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2002. 100 с.

Зайдельман Ф.Р., Забоева И.В. (ред). Структурно-функциональная организация почв и почвенного покрова Европейского Северо-Востока. СПб.: Наука, 2001. 224 с.

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

Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. 182 с.

Рейнер М. Реология: пер. с англ. М.: Наука, 1965. 224 с.

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.

Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лаптева Е.М. Физико-механические свойства автоморфных таежных почв Республики Коми (по данным реологических исследований) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2018. № 42. С. 24–53.

Шамрикова Е.В. Кислотность почв таежной и тундровой зон Европейского Северо-Востока России. СПб.: Наука, 2013. 160 с.

Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Быкова Г.С., Юдина А.А., Честнова В.В., Фомин Д.С., Клюева В.В. Современные приборные методы исследования гранулометрического состава, реологических характеристик и свойств поверхности твердой фазы почв // Вестник Оренбургского университета. 2015. Т. 181. №6. С. 140–145.

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России / Отв. ред. Г.В. Добровольский. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.

Batistao A.C., Holthusen D., Reichert J.M., Portela J.C. Soil solution composition affects microstructure of tropical saline alluvial soils in semi-arid environment // Soil Tillage. Res. 2020. Vol. 203. pp. 104662. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104662

Cho G.-C., Dodds J., Santamarina J.C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands // J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 2006. 132. pp. 591–602. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090 0241(2006) 132:5(591)

Ghezzehei T.A., Or D. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. 65, 624. https://doi.org/10.2136/ sssaj2001.653624x.624

Horn R., Smucker A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils // Soil Tillage. Res. 2005. Vol. 82. pp. 5–14.

Holthusen D., Pertile 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.

Holthusen D., Pertile 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. Res. 2019. Vol. 191. pp. 282–293.

Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn, R. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments. II. Microscale behavior and its relation to the mesoscale // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2012. 175. pp. 14–23. DOI:10.1002/jpln.201100076. https://doi.org/10.1002/jpln.201100076

Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil and Tillage Research. 2006. Vol. 91. pp. 1–14.

Markgraf W., Horn R., Gragg L.P., Cassell J.M. Rheological Investigations in Soil Micro Mechanics: Measuring Stiffness Degradation and Structural Stability on a Particle Scale // Progress in Management Engineering. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, USA. 2009. pp. 237–279.

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. Vol. 64. pp. 25–33.

Mezger T.G. The Rheology Handbook / 3-rd Revised Edition. Hanover, Germany, 2011. pp. 436.

Pertile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., Costa A. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils // Revista Brasileira de ciência do solo. 2016. No 40:e0150286. pp. 1–14.

Reichert J.M., Reinert D.J., Suzuki L.E.A.S., Horn R. Mecânica do solo. Física Do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do solo. 2010. pp. 298.

Stoppe N., Horn R. Microstructural strength of tidal soils – a rheometric approach to develop pedotransfer functions // J. Hydrol. Hydromech. 2018. Vol. 66. pp. 87–96. DOI: 10.1515/johh-2017-0031

Teamrat A., Ghezzehei T.A., Or D. Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses // Soil Science Society of America Journal. 2001. Vol. 65(3). pp. 624–637.

World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015.

References

Bratcev A. A., Bratcev A. P. i dr.; Otv. red. A.I.Taskaev. *Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologi.* [Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology]. M.: Drofa; Dik, 1997. 115 p.

Vorob'eva L. A. (red). *Teorija i praktika himicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of chemical analysis of soils]. M.: GEOS, 2006. 400 p.

Dobrovol'skij G. V., Taskaev A. I., Zaboeva I.V. *Atlas pochv Respubliki Komi* [Atlas of soils of the Komi Republic]. Syktyvkar: OOO «Komi respublikanskaja tipografija», 2010. 356 p.

Zaboeva I. V. Pochvy i zemel'nye resursy Komi ASSR. [Soils and land resources of the Komi ASSR]. Syktyvkar: Komi knizhnoe izdatel'stvo, 1975. 344 p.

Zaboeva I. V., Lapteva E. M., Beznosikov V. A., i dr.; otv. red. I. V. Zaboeva. *Putevoditel' nauchnoj pochvennoj jekskursii. Lesnaja zona (sezonno-promerzajushhie pochvy)* [A guide to a scientific soil excursion. Forest zone (seasonally frozen soils)]. Syktyvkar.: Institut biologii Komi NC UrO RAN, 2002. 100 p.

Zajdel'man F. R., Zaboeva I. V. (red). *Strukturno-funkcional'naja organizacija pochv i pochvennogo pokrova Evropejskogo Severo-Vostoka* [Structural and functional organization of soils and soil cover of the European Northeast]. SPb.: Nauka, 2001. 224 p.

Kljueva V. V., Hajdapova D. D. Reologicheskie svojstva obrazcov estestvennogo i narushennogo slozhenija dernovo-podzolistoj i agrodernovo-podzolistoj pochvy [Rheological properties of natural and disturbed structure samples of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soil] // *Bjul. Pochv. in-ta im. V. V. Dokuchaeva*. 2017. Vyp. 89. pp. 21–35. DOI: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35

Polevoj opredelitel' pochv Rossii [Field soil determinant of Russia]. M.: Pochvennyj in-t im. V. V. Dokuchaeva. 2008. 182 p.

Rejner M. *Reologija* [Rheology]: per. s angl. M.: Nauka, 1965. 224 p.

Hajdapova D. D., Chestnova V. V., Shein E. V., Milanovskij E. Yu. Reologicheskie svojstva chernozemov tipichnyh (Kurskaja oblast') pri razlichnom zemlepol'zovanii. [Rheological properties of typical chernozems (Kursk region) with different land use] // *Pochvovedenie*. 2016. no. 8. pp. 955–963.

Holopov Yu. V., Hajdapova D. D., Lapteva E. M. Fiziko-mehanicheskie svojstva avtomorfnyh taezhnyh pochv Respubliki Komi (po dannym reologicheskih issledovanij) [Physico-mechanical properties of automorphic taiga soils of the Komi Republic (according to rheological studies)] // *Vestn. Tom. gos. un-ta. Biologija*. 2018. no 42. pp. 24–53.

Shamrikova E. V. *Kislotnost' pochv taezhnoj i tundrovoj zon Evropejskogo Severo-Vostoka Rossii* [Soil acidity of the taiga and tundra zones of the European Northeast of Russia]. SPb.: Nauka, 2013. 160 p.

Shein E. V., Milanovskij E. Yu., Hajdapova D. D., Bykova G. S., Judina A. A. Chestnova V. V., Fomin D. S., Kljueva V. V. Sovremennye pribornye metody issledovanija granulometricheskogo sostava, reologicheskih harakteristik i svojstv poverhnosti tverdoj fazy pochv [Modern instrumentation methods for studying the granulometric composition, rheological characteristics and surface properties of the solid phase of soils] // *Vestnik Orenburgskogo universiteta*. 2015. V. 181, no 6. pp. 140–145.

Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I; otv. red. G. V. Dobrovol'skij. *Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk: Ojkumena. 2004. 341 p.

Batistao A.C., Holthusen D., Reichert J.M., Portela J.C. Soil solution composition affects microstructure of tropical saline alluvial soils in semi-arid environment // Soil Tillage. Res. 2020. Vol. 203. pp. 104662. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104662

Cho G.-C., Dodds J., Santamarina J.C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands // J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 2006. 132. pp. 591–602. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090 0241(2006) 132:5(591)

Ghezzehei T.A., Or D. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. 65, 624. https://doi.org/10.2136/ sssaj2001.653624x.624

Horn R., Smucker A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils // Soil Tillage. Res. 2005. Vol. 82. pp. 5–14.

Holthusen D., Pertile 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.

Holthusen D., Pertile 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. Res. 2019. Vol. 191. pp. 282–293.

Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn, R. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments. II. Microscale behavior and its relation to the mesoscale // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2012. 175. pp. 14–23. DOI:10.1002/jpln.201100076. https://doi.org/10.1002/jpln.201100076

Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil and Tillage Research. 2006. Vol. 91. pp. 1–14.

Markgraf W., Horn R., Gragg L.P., Cassell J.M. Rheological Investigations in Soil Micro Mechanics: Measuring Stiffness Degradation and Structural Stability on a Particle Scale // Progress in Management Engineering. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, USA. 2009. pp. 237–279.

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. Vol. 64. pp. 25–33.

Mezger T.G. The Rheology Handbook / 3-rd Revised Edition. Hanover, Germany, 2011. pp. 436.

Pertile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., Costa A. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils // Revista Brasileira de ciência do solo. 2016. № 40:e0150286. pp. 1–14.

Reichert J.M., Reinert D.J., Suzuki L.E.A.S., Horn R. Mecânica do solo. Física Do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do solo. 2010. pp. 298.

Stoppe N., Horn R. Microstructural strength of tidal soils – a rheometric approach to develop pedotransfer functions // J. Hydrol. Hydromech. 2018. Vol. 66. pp. 87–96. DOI: 10.1515/johh-2017-0031

Teamrat A., Ghezzehei T.A., Or D. Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses // Soil Science Society of America Journal. 2001. Vol. 65(3). pp. 624–637.

World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. No. 106. FAO, Rome, 2015.