

УДК 631.43

DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-281-321



Ссылки для цитирования:

Клюева В.В. Цифровая реометрия в современных почвенных исследованиях (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 281-321. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-281-321

Cite this article as:

Klyueva V.V., The rheometry approach in modern soil studies: a review, Dokuchaev Soil Bulletin, 2024, V. 121, pp. 281-321, DOI: 10.19047/0136-1694-2024-121-281-321

Цифровая реометрия в современных почвенных исследованиях (обзор)

© 2024 г. В. В. Клюева

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
<https://orcid.org/0000-0003-4823-444X>, e-mail: vvklyueva@gmail.com.

Поступила в редакцию 22.12.2023, после доработки 13.03.2024,
принята к публикации 14.11.2024

Резюме: Цифровая почвенная реометрия – это активно развивающееся относительно новое перспективное направление, занимающее на данный момент небольшую долю в почвенных и агрофизических исследованиях. В работе представлен обзор применения реометрического подхода при изучении механического поведения почв в отечественных и зарубежных исследованиях. Описаны основные теоретические положения методов осцилляционной амплитудной развертки (oscillatory amplitude sweep test) и осцилляционного теста с контролируемой деформацией (oscillatory test with controlled strain, resilience test) в приложении к почвенной структуре как объекту исследований. В статье дана характеристика количественных деформационных и прочностных показателей (модуль накопления G' , диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, кривая напряжения сдвига τ , максимальное напряжение сдвига $\tau_{\max}$, индекс восстановления структуры R и др.), описывающих механические свойства почв на микроуровне структурной организации, получаемых упомянутыми методами. Отдельно представлены технические моменты подготовки почвы к реометрическим исследованиям: влияние структуры

и влажности образцов, температуры и нормальной силы, задаваемых в протоколе исследования на реометре, на проведение испытания и получаемые данные. В статье рассмотрены направления исследований в рамках описываемого подхода, сформировавшиеся более чем за 20 лет применения реометрии в почвенных исследованиях и кратко представлены результаты работ различных авторов. На основе проведенного анализа исследовательских работ охарактеризованы направления дальнейшего развития реометрического подхода в почвенных исследованиях.

Ключевые слова: реометр; почвенная структура; механические свойства почв; деформационные и прочностные показатели почв; амплитудная развертка; тест на тиксотропию.

The rheometry approach in modern soil studies: a review

© 2024 V. V. Klyueva

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-4823-444X>, e-mail: vvklyueva@gmail.com.*

Received 22.12.2023, Revised 13.03.2024, Accepted 14.11.2024

Abstract: Digital soil rheometry is a relatively new and rapidly developing research direction that currently occupies a small niche in soil and agrophysics studies. This paper presents a review of studies based on the rheometry approach as part of soil mechanics research in different countries. The fundamental principles and equations of oscillatory amplitude sweep tests and oscillatory tests with controlled strain (resilience test) are described, with a focus on soil structure as the main object of the study. Key deformation and strength parameters (storage and loss moduli (G' and G''), the linear viscoelasticity range (LVE-range), shear stress (τ), structural recovery index (R), etc.) describing the mechanical behavior of the soil at the microstructural level are discussed. This paper also highlights the influence of soil preparation: soil structure, water content, temperature, and the normal force applied during tests as parts of the research protocol – on the obtained results. Furthermore, this review examines research trends within the rheometry approach that have emerged over the past two decades of its application to soil studies. Based on the analysis of existing studies, potential directions for the further development of rheometry in soil research are proposed.

Keywords: digital modular compact rheometer; soil structure; soil mechanical behavior; deformation and strength soil parameters; amplitude sweep test; thixotropy (resilience) test.

ВВЕДЕНИЕ

Механические свойства почвы, или набор показателей, описывающих ее деформационные и прочностные свойства под действием внешних нагрузок, относятся к одной из важных почвенных функций в экосистеме – опорной (Physical stability and support function) (Andrews et al., 2004; Rabot et al., 2018). Характеристика механической устойчивости почв важна в решении широкого ряда научных и практических вопросов: оценках противоэрозионной устойчивости почв, риска развития или наличия необратимых деформаций в почве и деградации почвенных свойств, проходимости сельскохозяйственной техники, ограничивающих и оптимальных условий обработки почвы, роста и развития семян и корневых систем растений и т. д. (Encyclopedia of agrophysics, 2011; Horn et al., 2019; Rabot et al., 2018). Одной из характеристик механических свойств (параметров) почв является мультимасштабность их проявления. На каждом следующем уровне организации почвенного покрова, от молекулярно-ионного до горизонтного (Воронин, 1984), почвенная система усложняется, приобретает новые свойства, и, как следствие, одни показатели могут характеризовать только меру вероятности агрегации частиц, например, в случае размера и формы частиц, дзета-потенциала системы, тогда как другие – непосредственно прочность (устойчивость) почвенной структуры (напряжение сдвига, угол внутреннего трения, сцепление, предкомпрессионное напряжение и т. д.) (Horn et al., 2019).

К настоящему моменту существует большое количество подходов и современных развивающихся концепций к определению структуры почвы (Качинский, 1965; Воронин, 1984; Шеин, 2005; Encyclopedia of agrophysics, 2011; Lal, 1991; Rabot et al., 2018; Vogel H.J. et al., 2021). В данной работе под структурой почвы будем понимать пространственное расположение твердых частиц и пор в масштабах до почвенного горизонта, представленное агрегатами с присущей им иерархичностью строения (Yudina, Kuzyakov, 2023). Объемность и многокомпонентность понятия

“структура почвы” определяют необходимость следующего дополнения: структура почвы характеризуется тремя основными группами параметров: морфометрическими и геометрическими, энергетическими и химическими. К первой группе относятся размер, форма, ориентация, количественное соотношение структурных единиц почвы. В группу энергетических показателей входят механическая устойчивость и водоустойчивость агрегатов, параметры, описывающие реологическое поведение, устойчивость к процессам инфильтрации, набуханию-усадке, увлажнению-высыханию, замерзанию-оттаиванию. К последней группе химических параметров относятся элементный и химический состав твердых частиц почвы.

В данной работе при характеристике показателей механической устойчивости структуры почвы на разных масштабных уровнях будут использоваться понятия микроструктура и мезоструктура почвы. Данное разделение включает в себя не только различные уровни организации почвы, но и технические особенности и возможности методов, применяющихся в исследованиях. То есть к микроуровню структуры почвы относятся уровни элементарных почвенных частиц и микроагрегатов при изучаемом объеме почвенных образцов до 10 см^3 , к мезоуровню – агрегатный и частично горизонтный масштабные уровни при объеме образца до $100\text{--}300 \text{ см}^3$ (по Holthusen et al., 2012a).

Для изучения показателей механического поведения почвы в разных масштабах существует ряд различных подходов, имеющих долгую историю применения (напр., методики ГОСТов) (ГОСТ 12248.1-2020, 2020; ГОСТ 12248.3-2020, 2020; ГОСТ 12248.4-2020, 2020), но в настоящее время появляются методы, только раскрывающие свои возможности в вопросах изучения почвы как объекта. Одним из таких методов является цифровая реометрия, изучающая устойчивость микроструктуры почвы и позволяющая получить обширный ряд количественных прочностных и деформационных показателей.

РЕОМЕТРИЯ В РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОЧВ

Реология как научная дисциплина представляет собой направление на пересечении физики и физической химии и изуча-

ет процессы деформации и течения материалов (Mezger, 2014).

Реологические исследования почв берут свое начало в реологических исследованиях грунтов, при этом вместе они являются частью большого научного направления – механики почв и грунтов (Вялов, 1978). Основные концепции и законы (уравнения, модели, представления), охватывающие реологическое поведение почв и грунтов, описаны в ряде фундаментальных отечественных и зарубежных работ (Манучаров и др., 2013; Keedweel, 1984; Mezger, 2014; Mitchell, Soga, 2005; Suklje, 1969; Tanner, 2000; Terzaghi et al., 1996; Vyalov, 1984).

Исследованиями реологического поведения и механики мерзлых и глинистых грунтов в СССР занимались Цытович (Цытович, 1940), Вялов (Вялов, 1978), Воларович (Воларович, Лазовская, 1966); Маслов (Маслов, 1968), Месчан (Месчан, 1974), Ребиндер (Ребиндер, 1979), Осипов (Осипов и др., 1989) и другие.

Развитие направления исследований реологического поведения почв в отечественной науке началось благодаря работам Аbruковой Л.П., Аbruковой В.В., Манучарова А.С. и других. В этих работах исследовались реологические кривые почв, описывался вид структурных связей между почвенными частицами (Аbruкова, 1970; Манучаров, 1983; Манучаров, Аbruкова, 1983) с применением вискозиметров Воларовича и Реотеста-2, а также конического пластометра Ребиндера (Клюева, 2019). Проявление таких явлений как тиксотропия (Аbruкова, 1970; Аbruкова, Манучаров, 1986), реопексия (Аbruкова, 1976; Аbruкова, Манучаров, 1985), дилатансия (Аbruкова, 1980) в различных типах почв наблюдалось в ряде исследований.

Современные представления о реометрическом подходе как о технической базе реологических исследований

В настоящее время для определения реологических свойств грунтов и почв: упругости, пластичности, вязкости, текучести, прочности – используются две группы приборов: вискозиметры и реометры (Mezger, 2014). Вискозиметры (современные и более старые модели, как, например, РВ-8) представляют собой приборы для определения вязкости и текучести жидкообразных тел, имеют

более простую конструкцию и низкую стоимость по сравнению с реометрами. Реометры являются более современными приборами, их функционал включает функционал вискозиметров и дополнен возможностью изучения деформационных характеристик твердых тел (т. е. реометр является вискозиметром, но не наоборот). Помимо вышеперечисленных фактов, реометры имеют возможность регуляции нормальной силы и температуры при проведении испытаний.

Согласно определению, реометрия в широком значении – это изучение реологических параметров веществ и материалов и получение количественных данных в рамках реологических исследований (Mezger, 2014). В настоящий момент в термин “реометрия” в научных статьях и практических руководствах вкладывается более узкое значение: использование определенных измерительных систем, инструментов и методов испытаний, то есть подразумевается применение именно ротационных и колебательных цифровых реометров как самостоятельного методического подхода с отделением его от вискозиметрии – подхода, использующего вискозиметры. Для определения вязких свойств материалов проводятся ротационные испытания (rotational tests), для оценки вязкоупругих свойств – испытания на ползучесть (creep tests), испытания на релаксацию (relaxation tests) и колебательные (осцилляционные) испытания (oscillatory tests) (Mezger, 2014; Шрамм, 2003). Технический прогресс и конкуренция на рынке промышленного и лабораторного оборудования привели к появлению широкого ряда цифровых высокоточных реометров разных производителей (напр., фирм Anton Paar (Австрия), Thermo Fisher Scientific (Германия), Brookfield Ametek (США) и т. д.). Существующие в настоящий момент реометры продолжают увеличивать точность, масштаб и объем планируемых исследований благодаря постоянному улучшению своих технических характеристик и возможности дополнительной комплектации специальными аксессуарами и функциями (напр., динамический механический анализ, реология растяжения, реооптика и т. д.), что приводит к появлению поколений (линеек) приборов, адаптированных под задачи различного уровня сложности (напр., <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rheometer-mcr-102-302->

[502/?sku=241353](#)).

Развитие реометрии в почвенных исследованиях

Базовыми областями применения реометрии являются химическая и нефтехимическая, пищевая промышленности, а также промышленность строительных материалов (Mezger, 2014).

Широкое применение современной реометрической техники для изучения почв было начато в начале 2000-х годов с исследовательской работы Ghezzehei и Or (Ghezzehei, Or, 2001). В данном исследовании изучалось реологическое поведение почв и глин с использованием ротационного реометра с измерительной системой параллельных пластин при постоянной и осцилляционной нагрузке, имитирующей деформации в почве, вызываемые капиллярными силами, нагрузкой вышележащих почвенных горизонтов или проходом сельскохозяйственной техники, соответственно.

Отметим, что блок исследований в области почвенной реометрии был изначально связан с изучением реологического поведения отдельных типов почв (напр., Хайдапова и др., 2016; Холопов и др., 2018; Markgraf et al., 2006; Pertile et al., 2016). В последние годы направление расширилось и продолжает развиваться благодаря методическим работам, а также комплексным или сопряженным с другими подходами и методами исследованиям (Horn et al., 2019; Hosseinpour-Ashenaabad et al., 2022). Выделяются научные группы исследователей Германии, Бразилии и России, работающие в области почвенной реометрии.

Основные теоретические положения реологических исследований почв с использованием реометрического подхода были подробно описаны в ряде работ (Baumgarten, Horn, 2013; Markgraf et al., 2006). Более детальный обзор методических особенностей реометрии представлен в следующих главах данной статьи.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА В ПОЧВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Показатели механической устойчивости почвенной структуры

Общие положения

Теоретические положения реометрии базируются на физических законах. Введем в кратком виде некоторые понятия и определения. Деформация – это изменение относительного положения частиц тела, связанное с их перемещением, но без разрыва сплошности. Деформация называется упругой (обратимой: elastic, reversible), если она исчезает при удалении вызывающей ее нагрузки, и пластической (необратимой: plastic, irreversible), если после снятия нагрузки, она не исчезает. При постоянной нагрузке идеально упругое тело деформируется немедленно и остается деформированным до тех пор, пока прилагается нагрузка. После ее снятия возникшая ранее деформация сразу и полностью исчезает, т. е. после цикла нагрузки идеально упругий материал полностью возвращается в исходное состояние. Упругость как свойство сохраняется у реальных тел до определенного момента или предела нагрузки – предела упругости. После его достижения в теле начинают проявляться остаточные или пластические изменения формы (деформации), которые не исчезают с течением времени при удалении нагрузки. Если после области упругого поведения реальное тело разрушается, то считается, что тело обладает хрупким разрушением, если же тело проявляет признаки текучести, то в данном случае можно говорить о пластическом разрушении. Пластическими телами называются тела с выраженными остаточными деформациями или пластичностью (Теория и методы физики почв, 2007; Шрамм, 2003; Das, 2008; Mezger, 2014).

Методы в реометрическом подходе

Одними из самых распространенных методов для оценки микромеханического поведения почв в реометрическом подходе на настоящий момент являются осцилляционный тест амплитудной развертки (amplitude sweep tests) (Horn et al., 2019) и испытания на тиксотропию (resilience (thixotropy) tests) (Batistão et al., 2020).

1. Осцилляционная амплитудная развертка (oscillatory amplitude sweep test–AST).

Данный метод предполагает внешнюю нагрузку в виде осцилляционного сдвига на почвенный образец, находящийся между параллельными плато (рис. 1).

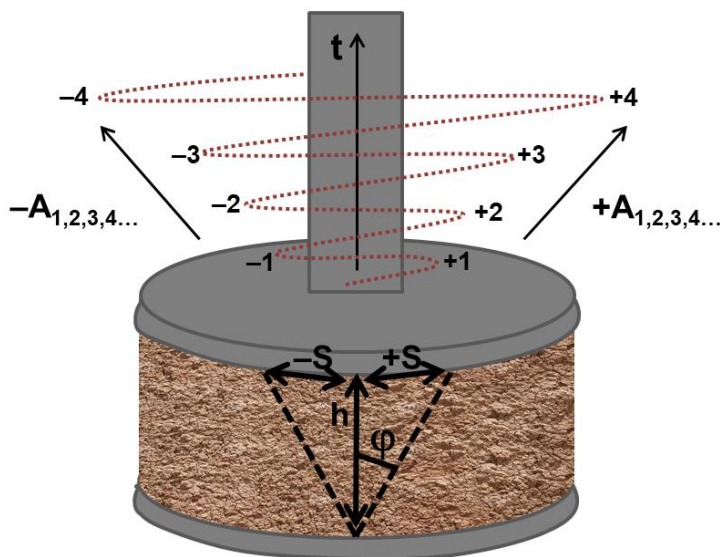


Рис. 1. Схематическое изображение осцилляционного амплитудного теста: верхнее и нижнее плато обозначены серым, почва – коричневым цветом. Верхнее плато движется с увеличивающейся амплитудой колебаний A в осцилляционном режиме (попеременно в левую и правую стороны, $+1$ и -1 и т. д. – равные положительные и отрицательные амплитуды), вызывая соответствующие отклонения $\pm S$ образца с углом отклонения $\pm \phi$ в зазоре h (по Mezger, 2014; Pértile et al., 2018).

Fig. 1. Scheme of the oscillatory amplitude sweep test: the upper and lower plates are indicated in gray, the soil is indicated in brown. The upper plate is rotated with an increasing oscillatory amplitude A (alternately to the left and right sides, $+1$ and -1 , etc. are equal positive and negative amplitudes), causing corresponding deflection distances $\pm S$ of the sample with a deflection angles $\pm \phi$ in the gap h (adapted from Mezger, 2014; Pértile et al., 2018).

Необходимо отметить, что точное определение реологических параметров возможно только при определенных условиях сдвига: однородной деформации образца и наличия сцепления его поверхностей с нижним и верхним плато без эффектов “проскальзывания”. Поэтому очень важны пробоподготовка образца и тщательный подбор измерительной системы для определенного объекта исследования. В случае почвенных образцов первое касается соблюдения аккуратности при просеивании и (или) растирании, то есть гомогенизации образца, а также при подготовке насыпного образца с задаваемой плотностью, а второе – применения шероховатой измерительной системы с засечками (рис. 1) (Клюева, 2019; Клюева, Хайдапова, 2020; Mezger, 2014).

На рисунке 1 показан принцип AST метода. Верхнее плато работает в осцилляционном режиме испытания, что приводит к увеличивающемуся положительному и отрицательному отклонению почвенного образца относительно положения в нулевой момент времени в зазоре между верхним и нижним плато реометра. Поведение идеально упругих тел (или поведение тел в области упругих деформаций) при деформации сдвига традиционно объясняется законом Гука: деформация (угол сдвига) пропорциональна касательному напряжению, приложенному к телу:

$$\tau(t) = G^* * \gamma(t),$$

где γ – деформация сдвига, G^* – комплексный модуль сдвига при осцилляционном сдвиге, τ – напряжение сдвига.

Закон Ньютона характеризует поведение идеально вязких тел: касательное напряжение, возникающее между соседними слоями при течении жидкости пропорционально поперечному градиенту скорости (скорости сдвига):

$$\tau(t) = \eta^* * \dot{\gamma}(t),$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость деформации сдвига (dv/dh), η^* – комплексная динамическая вязкость, τ – напряжение сдвига.

Описанные выше модели поведения относятся к поведению идеальных тел. Почва как природный объект обладает признаками как упругого, так и вязкого поведения, характеризующего в общем

как вязкоупругое. Моделями, описывающими подобное поведение, являются, в частности, модели Максвелла и Кельвина–Войта.

Одним из широко распространенных протоколов AST теста является режим с установленными значениями деформации сдвига γ (controlled shear deformation). В данном случае напряжение сдвига τ и комплексный модуль сдвига G^* – это расчетные показатели первой очереди, вычисляемые из значений угла сдвига δ и крутящего момента.

Поскольку для идеально упругих тел комплексный модуль сдвига $G^* = \tau(t)/\gamma(t)$ является постоянной величиной, кривая напряжения сдвига $\tau(t)$ всегда находится “в фазе” с кривой деформации $\gamma(t)$, т. е. обе синусоидальные кривые регистрируются реометром без задержки между заданным значением и реальным откликом образца в виде синусоид. Эти кривые переходят через нулевые значения в одинаковые моменты времени (между данными кривыми нет фазового сдвига ($\delta = 0^\circ$)). При этом вид кривой – синусоида или косинусоида – для кривых напряжения сдвига, деформации и скорости деформации связан с особенностями движения верхнего плато и отклика образца в осцилляционном режиме (Mezger, 2014).

Для идеально вязких тел комплексная вязкость $\eta^* = \tau(t)/\dot{\gamma}(t)$ является константой, и кривая напряжения сдвига $\tau(t)$ всегда находится “в фазе” с кривой скорости деформации $\dot{\gamma}(t)$, эти косинусоидальные кривые регистрируются реометром без задержки между заданными и реальными значениями. Для идеально вязкого поведения характерна задержка между косинусоидальной кривой напряжения сдвига τ и синусоидальной кривой деформации γ при угле фазового сдвига $\delta = 90^\circ$.

Рисунок 2 отображает результирующую синусоидальную кривую поведения (напряжение сдвига $\tau(t)$) реального вязкоупругого тела $\tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega t + \delta)$, где ω – угловая частота. В данном случае фазовый угол сдвига δ описывается значениями от 0 до 90° (рис. 2) (детали метода можно найти в Клюева, 2019; Хайдапова и др., 2016; Baumgarten, Horn, 2013; Markgraf et al., 2006; Mezger, 2014).

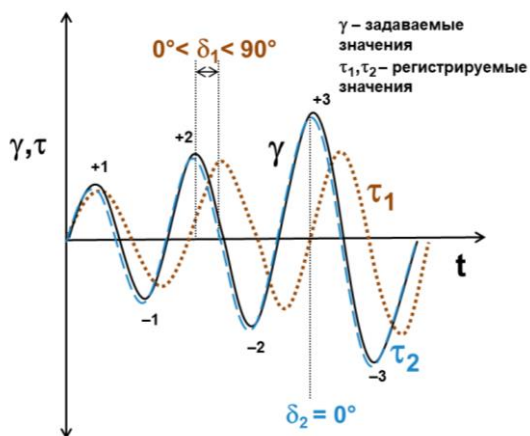


Рис. 2. Схематическое изображение поведения различных тел в осцилляционном амплитудном тесте (по Mezger, 2014; Pértile et al., 2018). Вязкоупругое тело (почва): угол сдвига δ_1 между задаваемой кривой γ (черный цвет) и результирующей кривой τ_1 (коричневый цвет) равен $0^\circ < \delta_1 < 90^\circ$; идеально упругое тело (модель): регистрируемая кривая τ_2 (голубой цвет), угол сдвига $\delta_2 = 0^\circ$.

Fig. 2. Scheme of the behavior of various bodies in the oscillatory amplitude sweep test (adapted from Mezger, 2014; Pértile et al., 2018). Viscoelastic body (soil): the shift angle δ_1 between the given curve γ (black color) and the resulting curve τ_1 (brown color) is $0^\circ < \delta_1 < 90^\circ$; ideally elastic body (model): resulting curve τ_2 (light blue color), shift angle $\delta_2 = 0^\circ$.

Следует подробно рассмотреть физическое значение модулей накопления G' и потерь G'' , являющихся расчетными показателями второй очереди при расшифровке реометрических данных.

Упругий компонент вязкоупругого поведения характеризуется значениями *модуля накопления* G' . Данная составляющая представляет собой энергию, сохраненную в объекте во время осцилляционного теста, которая после прекращения нагрузки служит для восстановления почвенной структуры.

Аналогичным образом вязкий компонент вязкоупругого поведения реальных тел характеризуется значениями *модуля потерь*

G'' . Он представляет собой рассеянную (перешедшую в тепло), то есть потерянную на процессы перестроения элементов структуры энергию деформации. Благодаря рассеянию части энергии деформации происходит сдвиг в структуре почвенного образца.

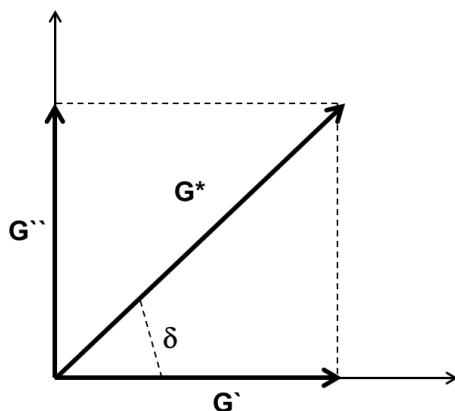


Рис. 3. Графическое представление комплексного модуля сдвига G^* и его составляющих: модулей накопления G' и потерь G'' (по Mezger, 2014).

Fig. 3. Vector diagram of the complex shear modulus G^* , storage modulus G' and loss modulus G'' (according to Mezger, 2014).

На рисунке 3 представлено геометрическое соотношение компонентов вязкоупругого поведения: упругого компонента как модуля накопления G' ($G' = G^* \cdot \cos\delta = (\tau/\gamma) \cdot \cos\delta$) и модуля потерь G'' как вязкого компонента ($G'' = G^* \cdot \sin\delta = (\tau/\gamma) \cdot \sin\delta$).

Также иногда модуль накопления G' называют реальной частью, а модуль потерь – мнимой частью комплексного модуля сдвига G^* .

Стоит отметить, что во избежание путаницы в употреблении терминов, вернее использовать понятия “модули накопления и потерь”, а не “модули упругости и вязкости”, так как обе величины G' и G'' представляют собой части комплексного модуля сдвига.

га G^* (модуля упругости второго рода) (Клюева, 2019; Mezger, 2014).

Поведение почвенной микроструктуры в осцилляционном амплитудном тесте делится на несколько фаз. На рисунке 4 представлены кривые модулей накопления и потерь, напряжения сдвига и характеризующие их области показатели. В графическом представлении результатов оси X и Y приводятся в логарифмическом формате, по причине того, что данный способ дает возможность детально анализировать области кривых с небольшими значениями деформации γ .

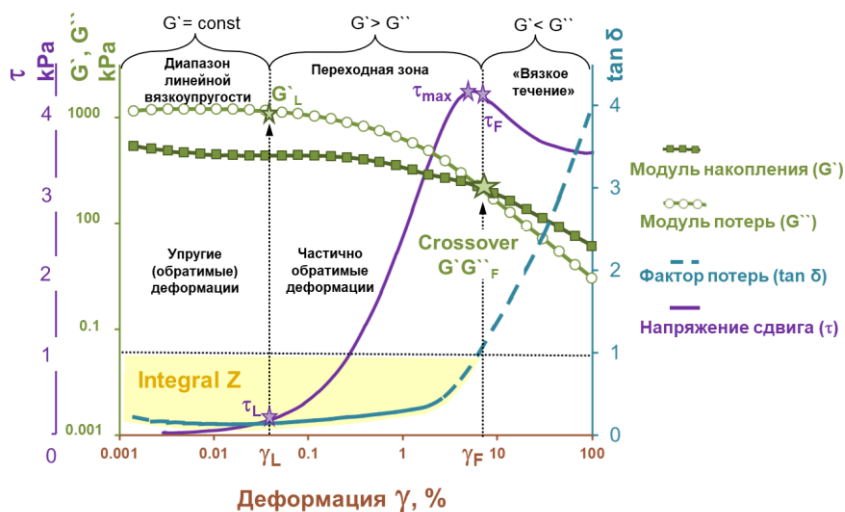


Рис. 4. Типичное представление результатов осцилляционного амплитудного теста для почвы: кривые модулей накопления G' и потерь G'' , напряжения сдвига τ , коэффициента потерь $\tan \delta$ и интегральная зона Z (оси x и y представлены в логарифмических шкалах), (по материалам Клюева, Хайдапова, 2020; Markgraf et al., 2006; Mezger, 2014).

Fig. 4. Results of the oscillatory amplitude test of the soil: curves of storage modulus G' and loss modulus G'' , shear stress τ , loss factor $\tan \delta$, and Integral Z (x and y axes are in logarithmic scales) (according to Klyueva, Khaidapova, 2020; Markgraf et al., 2006; Mezger, 2014).

Область 1 (рис. 4) – *диапазон линейной вязкоупругости или зона упругих деформаций (linear viscoelastic range, LVE-range)* – это область деформаций образца с практически параллельным ходом кривых модулей накопления G' и потерь G'' , ограничиваемая точкой текучести γ_L (yield point). Модуль накопления в данном диапазоне значительно больше модуля потерь. В пределах диапазона деформаций, не превышающих линейной вязкоупругости, электростатические силы между почвенными частицами служат движущей силой для их возвращения в начальное положение после снятия нагрузки, поэтому структура почвы не нарушается (Клюева, 2019; Клюева, Хайдапова, 2020; Holthusen et al., 2019; Mezger, 2014).

Диапазон линейной вязкоупругости может быть описан несколькими показателями: координатами точки текучести (значением деформации γ_L и модуля накопления G'_L) и напряжением сдвига τ_L на кривой напряжения сдвига, соответствующим точке текучести. Другими словами, описанные выше показатели характеризуют расстояние обратимого о смещения частиц в объеме почвы в измерении, величину упругости (жесткости) контактов между почвенными частицами и меру поведения образца (сдвиговую устойчивость) при упругих деформациях, соответственно.

Область 2 (yield/flow transition range) – это диапазон пластических (необратимых) деформаций от точки текучести до пересечения модулей накопления и потерь в точке Crossover (flow point). В данной области почвенная структура накапливает пластические деформации, но еще не наблюдается окончательного разрушения связей между почвенными частицами. Поведение почвы можно охарактеризовать как вязкоупругое в области 2.

Отдельно отметим разницу в характеризующих кривую модуля накопления G' точках yield point (максимальная величина упругой деформации) и flow point (Crossover): эти термины соответствуют понятиям “точка (предел) текучести” и “точка (вязкого) течения” в русском языке.

Область 3 (range of microstructural breakdown) – это область “вязкого течения” (вязкого поведения) при деформациях, превышающих таковые в точке Crossover (пересечения модулей накопления и потерь). В данной области практически полностью

разрушены структурные связи между частицами, ориентация частиц внутри системы завершена.

Количественно протяженность области пластических деформаций и вязкого течения описываются координатами точки Crossover (значением деформации γ_F и модулей накопления и потерь $G'G''_F$), также напряжением сдвига τ_F кривой напряжения сдвига, соответствующего точке начала вязкого течения. Данные параметры характеризуют суммарный интервал упругих и пластических деформаций, меру упругого и вязкого поведения и сдвиговую устойчивость почвы в точке начала вязкого течения, соответственно (Клюева, 2019; Клюева, Хайдапова, 2020; Mezger, 2014).

Коэффициент потерь (затухания) рассчитывается как отношение потерянной и запасенной энергии деформации: $\tan\delta = G''/G'$. Он показывает соотношение вязкой и упругой частей вязкоупругого деформационного поведения. В точке пересечения кривых модулей накопления и потерь вязкая и упругая составляющая вязкоупругого поведения становятся количественно равными, т. е. $G' = G''$, при этом $\tan\delta = 1$ или $\delta = 45^\circ$.

Интегральная зона (Integral Z) характеризует совокупно диапазон линейной вязкоупругости и область пластических деформаций и физически представляет собой площадь фигуры над кривой $\tan\delta$, ограничиваемую сверху прямой $\tan\delta = 1$ (рис. 4).

Значения величины напряжения сдвига в характерных точках его кривой τ_F , τ_L , $\tau_{\max}$ (рис. 4) описывают поведение структуры под действием осцилляционного сдвига. Хрупкость – способность структуры разрушаться без проявления значимого количества пластических или остаточных деформаций, т. е. это свойство обратнo пластичности. В рамках осцилляционного теста полуколичественно оценить проявление хрупкости и пластичности возможно с помощью отношения значений напряжений сдвига, соответствующих точкам Crossover и концу диапазона упругой деформации (LVE-range), т. е. τ_F/τ_L (также в литературе: *flow transition index* или *показатель перехода*). Чем ближе значение данного показателя к единице, тем больше проявление хрупкого поведения структуры почв под действием внешней осцилляционной нагрузки (Клюева, Хайдапова, 2020; Mezger, 2014). Ход кривой τ описывает поведение образца при сдвиге: хрупкое разрушение отмечается

при наличии выраженного максимума значений напряжения сдвига (с возможным частичным или полным восстановлением структуры после) либо пластическое разрушение при выходе значений кривой на плато (Holthusen et al., 2017).

Важной точкой кривой напряжения сдвига является *максимальное напряжение сдвига* $\tau_{\max}$, соответствующее максимальной сдвиговой устойчивости (прочности) микроструктуры почвы.

2. Осцилляционный тест с контролируемой деформацией (oscillatory test with controlled strain) для изучения тиксотропных свойств почв.

Тиксотропное поведение почвенной структуры означает снижение ее прочности во время сдвиговой нагрузки и более или менее быстрое, но полное или частичное структурное восстановление в последующий период (rest period). При этом цикл нарушения и восстановления структуры (оцениваемый значениями вязкости, модуля накопления, напряжения сдвига) является обратимым процессом.

Деформационное поведение почвенной структуры может считаться тиксотропным только при обязательном изучении полного цикла поведения: и уменьшения, и последующего восстановления прочности (нарушения и восстановления структуры), а также задании постоянной сдвиговой деформации в каждом из интервалов испытаний (Mezger, 2014).

Для подобных измерений и оценки потенциальной восстанавливаемости почвенной микроструктуры в дизайне эксперимента задаются три интервала (рис. 5):

Контрольный интервал 1. Эта область t_0 – t_1 является диапазоном низких значений сдвига или деформации. Задачей установления данного интервала в эксперименте является достижение постоянного значения базового реологического параметра как некоторого референсного значения. Данное значение будет использоваться для сравнения со значениями реологического параметра, полученными в Интервале 3 измерений, описывающего степень восстановления структуры. Деформация в данном интервале задается меньше значения деформации, ограничивающего диапазон линейной вязкоупругости LVE-range, определяемого в осцилляционном методе амплитудной развертки AST ($\gamma_0 < \gamma_L$).

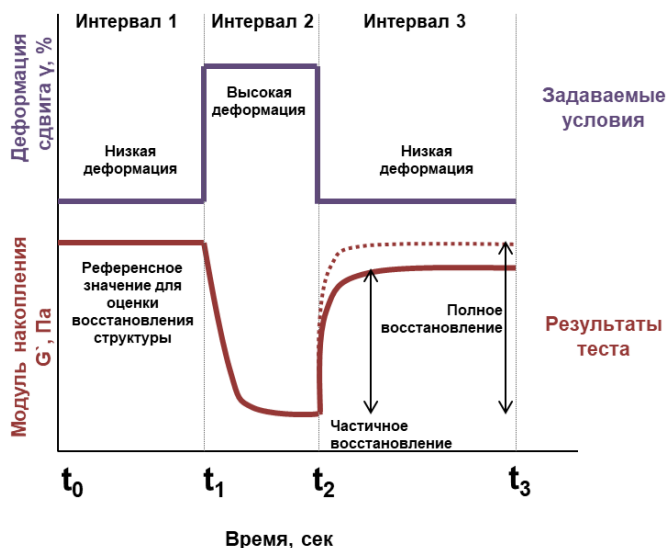


Рис. 5. Схематичное изображение эксперимента по изучению тиксотропных свойств почвы: задаваемые условия с тремя интервалами деформации сдвига γ (фиолетовая кривая); результаты теста на примере модуля накопления G' для оценки восстановления структуры (%) образца (красный цвет) (по Mezger, 2014; Batistão et al., 2020).

Fig. 5. Scheme of an experiment to study the soil thixotropic properties: preset three intervals of shear deformation γ (purple curve); test results by the example of the storage modulus G' to estimate the recovery (%) of the sample structure (red color) (adapted from Mezger, 2014; Batistão et al., 2020).

Интервал 2 – высокие значения сдвига или деформации образца. Данный интервал, охватывающий область поведения t_1 – t_2 , используется для моделирования интенсивных воздействий на почвенный образец и нарушения его структуры. Задаваемая деформация сдвига здесь должна соответствовать значению: $\gamma_0 < \gamma_1$. При этом степень восстановления структуры почвенного образца будет уменьшаться в ряду $\gamma_1 = \tau_{\max} > \gamma_1 = \tau_F$ (деформация при неполном разрушении структурных связей, т. е. ниже или равная предельному значению сдвиговой устойчивости микроструктуры

к осцилляционному воздействию в первом случае и напряжение сдвига в точке Crossover – во втором).

Интервал 3 – восстановление почвенной структуры в диапазоне условий t_2 – t_3 . В данном интервале повторно задаются условия Интервала 1, т. е. деформация Интервала 1 ($\gamma_2 = \gamma_0$).

Показателем, оценивающим восстановление микроструктуры почвы, является *индекс восстановления R (%)* или отношение модуля накопления в каждом временном промежутке Интервала 3 к среднему значению модуля накопления в интервале 1:

$$R(\%) = \frac{G'_{t2+i}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{t1} G'_i} * 100,$$

где G' – модуль накопления (Па), t_1 – t_2 – длительность диапазона высокой деформации (Batistão et al., 2020; Mezger, 2014).

Реометрические показатели и традиционные физико-механические параметры почвы

Под пластичностью грунта и почвы понимается способность деформироваться без разрыва своей сплошности и сохранять приобретенную форму после удаления внешней нагрузки, т. е. способность проявлять в основном остаточные (пластические) деформации (Сергеев и др., 1971; Трофимов и др., 2005). Пластичность как свойство проявляется в почве в определенном диапазоне содержания влаги: между влажностями, соответствующими переходу из полутвердой консистенции в пластичную (нижний *предел пластичности* (*plastic limit, PP*)) и из пластичной в текучую (верхний предел пластичности или *предел текучести* (*liquid limit, LL*)).

Широко используемые методы определения пределов пластичности и текучести (пределов Аттерберга) (ГОСТ 5180-2015; ISO 17892-12:2018) относятся к косвенным методам характеристики пластичности почв, то есть они позволяют получить только диапазон влажности, в котором почва проявляет пластичность.

Прямые же методы изучения пластичности напрямую оценивают наличие и величину пластических деформаций, присущих почве в различных условиях эксперимента (Сергеев и др., 1971). К последним методам, в частности, относятся и реометрические ме-

тоды, применяющиеся при условии поддержания постоянной влажности почвенных образцов во время теста. Реометрический метод осцилляционной амплитудной развертки, к примеру, позволяет количественно оценить изменение области пластических деформаций (деформации γ_L (диапазон LVE-range) и γ_F (точка Crossover) – выше) для разных внешних нагрузок, но одинаковой влажности нескольких групп сравниваемых почвенных образцов.

Подытоживая, можно сказать, что пределы пластичности и текучести по Аттербергу и реометрические показатели диапазона линейного вязкоупругого поведения LVE-range и точки вязкого течения (Crossover) характеризуют изменение механического поведения почвы при разных условиях: ее влажности в первом случае и увеличивающейся внешней нагрузки (нормальной силы и сдвига) во втором случае, соответственно. В работе Pértile с соавт. (Pértile et al., 2016) была предпринята попытка исследования пластичности почв как с помощью косвенных, так и прямых методов исследований: корреляционного анализа взаимосвязи между пределами текучести, пластичности и индексом пластичности и реометрическими показателями в осцилляционной амплитудной развертке.

Подготовка почвенных образцов для реометрических исследований

В рамках данной статьи для более полной характеристики реометрического направления в почвенных исследованиях отдельное внимание стоит уделить также методической стороне подхода: вопросам подготовки образцов и техническим деталям протокола исследования, так как они оказывают большое влияние на адекватность получаемых данных и возможность их последующей интерпретации, сравнения и использования (Holthusen et al., 2019; Horn et al., 2019; Markgraf, Horn, Peth, 2006; Mezger, 2014). Кратко опишем основные пункты: параметры почвенного образца (вид структурных связей и влажность) и задаваемые прибором параметры (внешняя нагрузка и температура).

Вид структурных связей. Различные типы почвенных образцов могут быть использованы в реометрических исследовани-

ях: образцы с нарушенной (просеянные) и с естественной структурой (монолиты) (Хитров, Хайдапова, 2019; Holthusen et al., 2019). При исследовании почвы с нарушенной структурой (т. е. почвенных суспензий или паст) в дизайне эксперимента большинства работ применяется растирание резиновым пестиком и используются сита ≤ 2 мм для просеивания (напр., <0.25 мм – Хайдапова и др., 2016; <0.5 мм – Holthusen et al., 2020a; <1 мм – Ключева, Хайдапова, 2017; <2 мм – Holthusen et al., 2020b). Преимуществом такого подхода является относительная простота манипуляций при подготовке почвы для анализа. Однако недостатком данного способа подготовки можно назвать необходимость ручного задания плотности образца в специальном кольце или цилиндре перед его насыщением (напр., Pertile et al., 2018). В этом случае при интерпретации получаемых величин реологических показателей речь идет о приблизительной оценке реологического поведения почвенного горизонта в пределах исследуемого объема почвенного образца относительно измерительного плато реометра. При анализе почвенного образца с естественной структурой получаемые результаты более приближены к реальному поведению почвы в полевых условиях. Однако отбор монолитного образца, равномерность и время насыщения, а также аккуратность при вырезании итогового образца под размеры измерительного плато реометра могут вызывать сложности на различных этапах эксперимента (Ключева, 2019).

Влажность образца. Во многих исследовательских работах показано, что влажность почвы играет первостепенную роль в изменении ее реологического поведения (Czibulya et al., 2010; Das, 2013; Encyclopedia of agrophysics, 2011; Ghezzehei, Or, 2001; Markgraf et al., 2006). Итоговая влажность (потенциал почвенной влаги) образцов определяются задачами исследования и обеспечиваются использованием тензиостатических установок (Pertile et al., 2016) или капиллярным насыщением дистиллированной водой в течение 24, 48 часов и т. д. (Холопов и др., 2018).

Температура. Исследования реологических параметров почвенных образцов ведутся при постоянных температурах (20 °C согласно протоколу по Markgraf et al., 2006), поддержание которых обеспечивается работой элементов Пельтье реометра.

Внешняя нагрузка во время теста. Нормальная сила F_n воздействия верхнего плато реометра на почвенный образец во время его сжатия для достижения зазора h (толщины) напрямую влияет на значения реологических показателей: при увеличении нормальной силы и соответствующего ей сжимающего давления σ_N наблюдается (не)линейное увеличение значений диапазона линейной вязкоупругости LVE-range (модуля накопления G'_L и деформации γ_L), максимального напряжения сдвига $\tau_{\max}$ и интегральной зоны I_z (Holthusen et al., 2017; Holthusen et al., 2019; Holthusen et al., 2020). В исследованиях было показано, что оптимальной силой воздействия верхнего плато на почвенный образец являются значения 10–12 Н при диаметре плато 25 мм (Markgraf et al., 2012; Markgraf et al., 2006; Pértile et al., 2016).

СОВРЕМЕННЫЕ РЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЧВ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Почвенная реометрия как направление, изучающее устойчивость почвенной микроструктуры, начало развиваться в России и за рубежом с выходом поисковой работы Ghezzehei и Or (Ghezzehei, Or, 2001), посвященной изучению реологического поведения ряда глин и почв. По прошествии более чем двух десятилетий можно выделить несколько направлений актуальных реометрических исследований.

Первое направление связано с изучением роли различных агрегирующих и диспергирующих факторов (например, вещественного состава: содержания органического и неорганического углерода, солей и т. д., минералогического и гранулометрического состава) в изменении устойчивости микроструктуры почв. Далее кратко приведем некоторые выявленные в исследованиях примеры влияния указанных факторов. Так, было показано значительное влияние содержания органического и неорганического углерода на увеличение областей упругих и необратимых деформаций, максимального напряжения сдвига (Хайдапова и др., 2016; Markgraf et al., 2012; Batistao et al., 2020). При этом отмечается, что содержание органического вещества является одним из главных химиче-

ских свойств почв, влияющих на устойчивость их структуры (Markgraf et al., 2012). Однако в частных случаях, например, в почвах с большим содержанием соединений алюминия и железа (оксосолях) гидроксиды железа и алюминия могут оказывать большее влияние на увеличение устойчивости почвенной структуры, чем органическое вещество (Markgraf, Horn, 2007). Кальций и натрий в составе почвенного поглощающего комплекса имеют агрегирующий и диспергирующий эффект, соответственно, что было показано на примере увеличения и снижения значений деформации диапазона упругого поведения (Markgraf et al., 2006; Markgraf, Horn, 2006). В нескольких работах показано, что такие факторы, как преобладание илистой фракции, по сравнению с пылевой (<0.002 и $0.002\text{--}0.05$ мм, соответственно), в составе гранулометрических фракций почвы, а также значимое содержание смектита в минералогическом составе, приводят к увеличению диапазонов упругого и пластичного поведения (Holthusen et al., 2017; Markgraf, Horn, 2006; Markgraf et al., 2006).

Изучение роли биологического фактора в устойчивости почв выделяется как отдельное, на настоящий момент небольшое, направление исследований с применением реометрии. Так, экссудаты грибов и растений могут изменять вязкость почвенных суспензий в модельных экспериментах, что приводит к изменению величин сцепления между почвенными частицами и агрегатами (Barré, Hallett, 2009; Naveed et al., 2017; Tarchitzky, Chen, 2002).

Другим направлением исследований является изучение влияния сельскохозяйственной деятельности человека на устойчивость почвенной микроструктуры, например, при использовании удобрений и при разных типах землепользования. Так, в полевом опыте Ротамстедской станции были сравнены варианты с многолетним внесением навоза и нитратных удобрений и выявлена большая устойчивость микроструктуры почвы в первом случае, что, по мнению авторов, связано с накоплением органического углерода (Markgraf et al., 2010). Применение же калийных удобрений на почвах имеет неоднозначный эффект на изменение диапазона линейной вязкоупругости и пластичного поведения, по результатам реометрических исследований (Holthusen et al., 2012a,b), и зависит от физико-химических свойств и минералогического

состава отдельной почвы. Тип землепользования оказывает влияние на параметры устойчивости почвенной структуры, но опосредованно, через совокупность изменения сразу нескольких химических и физических свойств почвы, например, плотности сложения, т. е. увеличения числа контактов между почвенными частицами, содержания органического вещества и т. д. В данном случае требуется выявление взаимосвязанных факторов и большая детальность при интерпретации результатов (Baumgarten et al., 2013; Markgraf et al., 2012).

Следующим отдельным направлением являются исследовательские работы по изучению прочностных и деформационных характеристик отдельных специфичных почвенных объектов для характеристики их физико-механических свойств. Например, были изучены тиксотропные почвы северо-востока России: выявлено, что ведущими факторами, оказывающими влияние на их реологическое поведение, являются содержание органического углерода и органо-минеральных веществ, а также илистой фракции. Указанная совокупность факторов проявляется в цементации почвенных частиц и формировании прочных межчастичных контактов (Хайдапова и др., 2014, Холопов и др., 2018). В работе Baumgarten с соавт. (Baumgarten, Dörner, Horn, 2013) были исследованы андосоли (Andosols) северного Чили: комплексно изучалось влияние минералогического состава и сельскохозяйственной нагрузки (выпаса скота) на сдвиговое поведение (кривая напряжения сдвига τ) и интегральную зону (Integral Z) почв. В качестве специфичных и редких объектов изучались почвы терра прета в Бразилии: их деформационные характеристики и тиксотропное поведение (Batistão et al., 2020). В исследовании антарктических почв (Batista et al., 2022) были воссозданы типичные условия циклов промерзания и оттаивания для данных почв и получены предварительные результаты влияния частоты промерзания на реологические параметры.

Оригинальное исследование с применением реометрии было проведено на почвах Бразилии (Sobucki et al., 2022). В ходе него изучалась возможность использования реометрических показателей в качестве количественных индикаторов проявления макропризнака – связности структуры (cohesiveness), являющейся важ-

ным диагностическим признаком, проявляющейся в полевых условиях и влияющей на возможность обработки почвы сельскохозяйственной техникой.

Отдельное методическое направление исследований – работы, изучающие влияние разных технических аспектов на результаты реометрических исследований. Так, в ряде работ (Клюева, Хайдапова, 2017; Клюева, Хайдапова, 2020; Хитров, Хайдапова, 2019; Holthusen et al., 2012b; Holthusen et al., 2019) сравнивалось реологическое поведение почв с нарушенной и ненарушенной структурой (пасты и микромонолитные образцы). На данный момент большинство исследовательских работ, использующих осцилляционный метод амплитудной развертки, проводится по протоколу, предложенному Markgraf с соавторами (Markgraf et al., 2006). В работе Holthusen с соавт. (Holthusen et al., 2020b) впервые в рамках реометрического подхода изучалось влияние различных частот осцилляционных колебаний на изменение реологических параметров почв на примере оксисолей Бразилии по сравнению с типичной частотой протокола (0.5 Гц). В ряде работ (Holthusen et al., 2017; Holthusen et al., 2019; Holthusen et al., 2020) исследовано влияние силы воздействия верхнего плато (нормальной силы F_n), контролирующей степень предварительного сжатия почвы для достижения заданного зазора между плато (т. е. толщины образца, в большинстве работ равной 4 мм) и влекущей за собой изменение значений реологических показателей почвы (см. выше).

Закономерным развитием описанных выше реометрических направлений и отдельных исследований из области, находящейся на экстенсивном этапе накопления новой информации и данных по различным почвенным объектам, является ее переход на интенсивный этап, т.е. поиск возможностей использования возможностей данного подхода для решения различных задач. На данный момент среди таких практических направлений отчетливо выделяются следующие: изучение структуры почв, процессов структурообразования и комплексная оценка механических свойств почв.

Например, впервые была предложена (Baumgarten, Horn, 2013) классификация устойчивости почвенной микроструктуры, основанная на пяти численных классах значений комплексного показателя Integral Z, описывающего суммарно области упругих и

пластических деформаций в методе осцилляционной амплитудной развертки.

Как было отмечено выше, реологические показатели, оцениваемые в том числе с помощью реометрического подхода, зависят одновременно от широкого ряда факторов: физических и химических свойств почв. В связи с этим в исследовательских работах последних лет начался поиск способов обобщающей оценки влияния разных факторов на сдвиговые и деформационные показатели микроструктуры почвы. Так, на большом массиве реометрических данных был применен подход педотрансферных функций для количественной оценки устойчивости почвенной микроструктуры на примере показателя Integral Z (microstructural stiffness) при имеющемся блоке данных по содержанию органического и неорганического углерода, железа, натрия, кальция и проч. для различных текстурных групп почв устья р. Эльбы (Stoppe, Horn, 2018).

Однако слабой стороной описанных выше исследований интегральной зоны почв, не позволяющей полноценно применить предложенные авторами подходы, является тот факт, что в работах анализировался массив данных ограниченного числа почв (на территории Великобритании, Испании, Германии, Чили).

Другим направлением возможных практических приложений реометрических исследований является их использование при комплексной оценке механических свойств почв различными методами и на нескольких структурных уровнях. Сама необходимость такой многоуровневой оценки в будущих исследованиях механических свойств почв неоднократно была аргументирована рядом авторов (Ajayi, Horn, 2017; Ajayi, Holthusen, Horn, 2016; Horn et al., 2019). Так, на примере почвенных паст с различной влажностью впервые проведено сравнение реометрического метода и метода сферического индентирования при оценке механических свойств почв на микроуровне (Hosseinpour-Ashenaabad et al., 2022).

Стоит отдельно отметить предложенную концепцию многоуровневой оценки деформационных и прочностных характеристик почв набором методов, охватывающих возможности изучения агрегации частиц и устойчивости структуры почв на усложняющихся уровнях организации (коллоидном – элементарных

почвенных частиц – агрегатном) и соответствующий ряд количественных и качественных параметров (Baumgarten, Horn, 2013; Horn et al., 2019). В рамках данной концепции среди прочего была показана взаимосвязь максимальной сдвиговой устойчивости $\tau_{\max}$, как прочности микроструктуры почвы, определенной реометрически, с показателем сжимаемости почвы C , полученным в методе циклических компрессионных нагрузок (т. е. микро- и мезоуровень почвенной структуры, соответственно) (Holthusen et al., 2012a).

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Цифровая почвенная реометрия – это активно развивающееся относительно новое направление, занимающее на данный момент небольшую долю в общем числе почвенных и агрофизических исследований. Современные реометры позволяют с большой производительностью изучать широкий ряд количественных деформационных и прочностных показателей, описывающих микроуровень структуры почвы. В настоящее время реометрический подход планомерно переходит от этапа накопления информации при изучении реологических свойств почв к поиску возможностей использования получаемых данных для решения различных научных и практических задач.

Основываясь на имеющихся исследовательских работах в рамках современных тенденций развития научных исследований можно выделить несколько очевидных направлений дальнейшего развития реометрического подхода в почвенных исследованиях (безусловно, предложенные авторами ниже направления не являются исчерпывающими).

“Наполнение” подхода экспериментальными данными. Это направление, являющееся основой для развития всех остальных, может быть охарактеризовано несколькими пунктами. Во-первых, вследствие небольшого абсолютного количества исследовательских работ в области реометрии остается насущным вопрос получения экспериментальных данных для разных типов ранее неисследованных почв. Во-вторых, существующее многообразие

внешней нагрузки на почву антропогенного и естественного характера делает необходимым воспроизведение данных условий в лабораторных экспериментах при исследовании их влияния на параметры структурной устойчивости почв. Технические возможности современного оборудования позволяют находить оптимальные параметры реометрического эксперимента (напр., диапазоны воздействующей нормальной силы и частоты осцилляции, время воздействия и т. д.), моделирующие частные ситуации. В-третьих, актуальной задачей остается определение основных физических, химических и биологических факторов, влияющих на устойчивость структуры разных почв в отдельных случаях, в том числе при сельскохозяйственном воздействии.

Совместные исследования. Различные методы изучения почвенной структуры (компьютерная микротомография, сканирующая электронная микроскопия и т. д.) позволят совместно с реометрией получить новые и (или) дополнительные количественные и качественные (в том числе визуальные) данные о связи формы, свойств поверхности почвенных частиц различной природы и показателей порового пространства с прочностными параметрами микроструктуры почв.

Комплексное изучение устойчивости почв на разных масштабных уровнях ее структурной организации. В настоящий момент требуется больше экспериментальных данных и их аналитики для изучения связи между традиционными показателями прочности почв и грунтов (таких как предкомпрессионное напряжение, сцепление и т. д., характеризующих мезоуровень структуры) и новыми показателями (прочность микроструктуры почвы $\tau_{\max}$, интегральная зона Integral Z и т. д., характеризующих микроуровень структуры). Если для первых зачастую имеются разработанные нормативные документы и классификации, то для вторых работа в этом направлении только начинается. Соответствующие указанным параметрам методы, безусловно, могут быть по отдельности использованы в исследовании механических свойств, однако совмещение нескольких подходов позволит более детально изучить деформации в почвах.

Рассчитываем, что будущие реометрические исследования позволят внести существенный вклад в понимание отдельных ас-

пектов механической устойчивости почв на микромасштабе как важной составляющей опорной функции почв, оценить роль химических, физических и биологических микропроцессов в мезо- и макропроцессах, лежащих в основе прочности почвенной структуры, и стать реометрическому подходу полезным инструментом в экологическом мониторинге.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрукова В.В., Манучаров А.С.* Некоторые особенности деформации почв при реологических исследованиях // Почвоведение. 1985. № 6. С. 89–96.
2. *Абрукова В.В., Манучаров А.С.* Реологическая характеристика тундровой поверхностно-глеевой почвы // Почвоведение. 1986. № 9. С. 44–52.
3. *Абрукова Л.П.* Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях // Почвоведение. 1970. № 3. С. 104–114.
4. *Абрукова Л.П.* Реопексия при реологических исследованиях почв // Почвоведение. 1976. № 5. С. 121–126.
5. *Абрукова Л.П.* Изучение тиксотропных свойств почв с применением ротационного вискозиметра РВ-8 // Почвоведение. 1980. № 8. С. 83–91.
6. *Волярович М.П., Лазовская Н.В.* Ротационные вискозиметры для исследования реологических свойств дисперсных систем и высокомолекулярных соединений (Обзор) // Коллоидный журнал. 1966. Т. 28. № 2. С. 198–213.
7. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
8. *Вялов С.С.* Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
9. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. М.: Стандартинформ, 2020. 20 с.
10. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 33 с.
11. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с.
12. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2019. 24 с.
13. *Качинский Н.А.* Физика почвы. М.: Высшая школа, 1965. 321 с.

14. *Клюева В.В.* Реологические свойства почв и их связь с физическими и химическими свойствами на примере дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного: Дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2019. 142 с.
15. *Клюева В.В., Хайдапова Д.Д.* Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 21–35. DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-21-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35).
16. *Клюева В.В., Хайдапова Д.Д.* Возможности использования реологических параметров почв в качестве физических показателей трансформации их структурного состояния // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 108–148. DOI: [10.19047/0136-1694-2020-103-108-148](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148).
17. *Манучаров А.С., Харитонов Г.В., Шеин Е.В.* Реология в почвоведении. М.: Университетская книга, 2013. 80 с.
18. *Манучаров А.С.* К использованию реологических исследований в почвоведении // Вестник Московского университета. Серия Почвоведение. 1983. № 3. С. 36–40.
19. *Манучаров А.С., Аbruкова В.В.* Структурно-механические свойства дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1983. № 4. С. 64–73.
20. *Маслов Н.Н.* Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Высш.школа, 1968. 631 с.
21. *Месчан С.Р.* Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения (с учетом временных эффектов). М.: Недра, 1974. 192 с.
22. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцев Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
23. *Рибиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: Наука, 1979. 384 с.
24. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Осипов В.И., Трофимов В.Т.* Грунтоведение. Издание третье, переработанное и дополненное. М.: Издательство Московского университета, 1971. 595 с.
25. Теория и методы физики почв: коллективная монография /под ред. *Е.В.Шеина, Л.О. Карпачевского*. М.: Гриф и К., 2007. 616 с.
26. *Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю. К., Зиангиров Р.С.* Грунтоведение. Москва: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
27. *Хайдапова Д.Д., Холопов, Ю.В., Забоева, И.В., Лаптева, Е.М.* Реологические особенности коагуляционной структуры северотаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв европейского северо-востока //

Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2014. № 1. С. 20–25.

28. 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. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>.

29. Хитров Н.Б., Хайдапова Д.Д. Вязкоупругое поведение вертикального солонча Каменной Степи // Почвоведение. 2019. № 7. С. 843–858. DOI: [10.1134/S0032180X19070050](https://doi.org/10.1134/S0032180X19070050).

30. Холопов Ю.В., Хайдапова Д.Д., Лантева Е.М. Реологические свойства северо-таежных автоморфных и полугидроморфных криометаморфических почв Европейского северо-востока России (Республика Коми) // Почвоведение. 2018. № 4. С. 439–450. DOI: [10.7868/s0032180x18040056](https://doi.org/10.7868/s0032180x18040056).

31. Цытович Н.А. Механика грунтов. Ленинград, Москва: Стройиздат, Наркомстрой, 1940. 388 с.

32. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.

33. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Пер. с англ. И.А. Лавыгина / под ред. В.Г. Куличихина. М.: КолосС, 2003. 312 с.

34. Ajayi A. E., Holthusen D., Horn R. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils // Soil & Tillage Research. 2016. Vol. 155. P. 166–175.

35. Ajayi A.E., Horn R. Biochar-induced changes in soil resilience: Effects of soil texture and biochar dosage // Pedosphere. 2017. Vol. 27. P. 236–247.

36. Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A. The Soil Management Assessment Framework // Soil Science Society of America Journal. 2004. Vol. 68. No. 6. P. 1945–1962. DOI: [10.2136/sssaj2004.1945](https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945).

37. Anton Paar GmbH. Modular Compact Rheometers. Products, 2023. URL: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rheometer-mcr-102-302-502/?sku=241353>.

38. Barré P., Hallett P.D. Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy // European Journal of Soil Science. 2009. Vol. 60. P. 525–538. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x).

39. Batista R.F., Reichert J.M., Holthusen D., Batistão A.C., Daher M., Schünemann A.L., Filho E.I.F., Schaefer C. E.G.R., Francelino M.R. Freeze-thaw cycles affecting rheological properties of Antarctic soils // Geoderma. 2022. Vol. 428. DOI: [10.1016/j.geoderma.2022.116220](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116220).

40. Batistão A.C., Holthusen D., Reichert J. M., dos Santos L.A.C., Campos M.C.C. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia,

Brazil // Geoderma. 2020. Vol. 363. P. 114130. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114130](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130).

41. Baumgarten W., Dörner J., Horn R. Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile // Soil & Tillage Research. 2013. Vol. 129. P. 48–60. DOI: [10.1016/j.still.2013.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.007).

42. Baumgarten W., Horn R. Assessing soil degradation by using a scale-spanning soil mechanical approach: A review. In: Advances in GeoEcology – Soil Degradation. Catena Verlag, 2013. P. 3–61.

43. Czibulya Z., Tombacz E., Szegi T., Micheli E., Zsolnay A. Standard state of soil dispersion // Applied Clay Science. 2010. Vol. 48. P. 594–601.

44. Das B.M. Advanced Soil Mechanics. CRC Press, 2008. 594 p.

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

46. 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. P. 624–637. DOI: [10.2136/sssaj2001.653624x](https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653624x).

47. Holthusen D., Batistão A.C., Reichert J.M. (2020a) Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content // Rheological Acta. 2020. Vol. 59. No. 8. P. 545–563. DOI: [10.1007/s00397-020-01219-3](https://doi.org/10.1007/s00397-020-01219-3).

48. Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn R. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2012a. Vol. 175. No. 1. P. 4–13. DOI: [10.1002/jpln.201100075](https://doi.org/10.1002/jpln.201100075).

49. 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. 2012b. Vol. 175. P. 14–23. DOI: [10.1002/jpln.201100076](https://doi.org/10.1002/jpln.201100076).

50. Holthusen D., Pértile P., Awe G.O., Reichert J.M. Soil density and oscillation frequency effects on viscoelasticity and shear resistance of subtropical Oxisols with varying clay content // Soil Tillage Research. 2020b. Vol. 203. P. 104677. DOI: [10.1016/j.still.2020.104677](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104677).

51. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R. Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses // Geoderma. 2017. Vol. 295. P. 129–141. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.034](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.034).

52. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R. Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions // Soil

- Tillage Research. 2019. Vol. 191. P. 282–293. DOI: [10.1016/j.still.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.014).
53. *Holthusen D., Peth S., Horn R., Kühn T.* Flow and deformation behavior at the microscale of soils from several long-term potassium fertilization trials in Germany // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2012. Vol. 175. P. 535–547. DOI: [10.1002/jpln.201100073](https://doi.org/10.1002/jpln.201100073).
54. *Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H.* Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? // Soil & Tillage Research. 2019. Vol. 195. P. 104388. DOI: [10.1016/j.still.2019.104388](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388).
55. *Hosseinpour-Ashenaabad R., Keller T., Larsbo M., Hallett P.D.* Dual-platform micromechanical characterization of soils: Oscillation shear rheometry and spherical indentation // Soil Tillage Research. 2022. Vol. 223. P. 105467. DOI: [10.1016/j.still.2022.105467](https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105467).
56. ISO 17892-12:2018. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 12: Determination of liquid and plastic limits.
57. *Keedwell M.J.* Rheology and Soil Mechanics. London, New York: MacMillan, 1984. 323 p.
58. *Lal R.* Soil Structure and Sustainability // Journal of Sustainable Agriculture. 1991. Iss. 4. P. 67–92. DOI: [10.1300/J064v01n04_06](https://doi.org/10.1300/J064v01n04_06).
59. *Markgraf W., Horn R.* Rheological-stiffness analysis of K⁺-treated and CaCO₃-rich soils // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2006. Vol. 169. P. 411–419. DOI: [10.1002/jpln.200521934](https://doi.org/10.1002/jpln.200521934).
60. *Markgraf W., Horn R.* Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils // Soil Science Society of America Journal. 2007. Vol. 71. P. 851–859. DOI: [10.2136/sssaj2006.0231](https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0231).
61. *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. Vol. 91. P. 1–14. DOI: [10.1016/j.still.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.007).
62. *Markgraf W., Moreno F., Horn R.* Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques // Vadose Zone Journal. 2012. Vol. 11. P. 1–11. DOI: [10.2136/vzj2011.0061](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0061).
63. *Markgraf W., Watts C., Whalley R., Horn R.* Influence of mineralogical compounds and organic matter on rheological properties: Classifying stiffness degradation in soils // Extended Abstracts – 21st Australian Clay Minerals Conference. Brisbane. 2010. P. 121–124.
64. *Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R.* Influence of organic matter on rheological properties of soil // Applied Clay Science. 2012. Vol. 64. P. 25–33. DOI: [10.1016/j.clay.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.009).

65. *Mezger T.G.* The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers. 4th edition. Hanover: Vincentz Network, 2014.
66. *Mitchell J.K., Soga K.* Fundamentals of soil behavior. 3rd edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 577 p.
67. *Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Koebnick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D.* Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time // *Eurasian Journal of Soil Science*. 2017. Vol. 68. P. 806–816. DOI: [10.1111/ejss.12487](https://doi.org/10.1111/ejss.12487).
68. *Pétille P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M.* Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities // *Scientia Agricola*. 2018. Vol. 75. No. 2. P. 154–162. DOI: [10.1590/1678-992X-2016-0267](https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267).
69. *Pétille P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A.* Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils // *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 2016. Vol. 40. P. 2–14. DOI: [10.1590/18069657rbcs20150286](https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150286).
70. *Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.-J.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review // *Geoderma*. 2018. Vol. 314. P. 122–137. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).
71. *Sobucki V., Holthusen D., Batistão A.C., Mota J. C. A., Reichert J. M.* Potential of rheometry in detecting cohesive soils in Brazil as an additional tool to morphological field description and tensile resistance quantification // *Geoderma Regional*. 2022. Vol. 30. P. e00553. DOI: [10.1016/j.geodrs.2022.e00553](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00553).
72. *Stoppe N., Horn R.* Microstructural strength of tidal soils - A rheometric approach to develop pedotransfer functions // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2018. Vol. 66. P. 87–96. DOI: [10.1515/johh-2017-0031](https://doi.org/10.1515/johh-2017-0031).
73. *Suklje L.* Rheological aspects of soil mechanics. London: Wiley Interscience, 1969. 590 p.
74. *Tanner R.I.* Engineering rheology. Oxford University Press: New York, 2000. 559 p.
75. *Tarchitzky J., Chen, Y.* Polysaccharides and pH effects on sodium montmorillonite: flocculation, dispersion, and rheological properties // *Soil Science*. 2002. Vol. 167. P. 791–801.
76. *Terzaghi K., Peck R.B., Nesri G.* Soil Mechanics in Engineering Practice. New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: John Wiley & Sons, 1996. 417 p.
77. *Vogel H.J., Balseiro-Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Weller U., Baveye P.C.* A holistic perspective on soil architecture

is needed as a key to soil functions // European Journal of Soil Science. 2021. Vol. 73. P. 1–14. DOI: [10.1111/ejss.13152](https://doi.org/10.1111/ejss.13152).

78. Vyalov S.S. Rheological fundamentals of soil mechanics. Development in geotechnical engineering. Elsevier: Amsterdam, 1986. 560 p.

79. Yudina A., Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores // Geoderma. 2023. Vol. 434. DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116478](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478).

REFERENCES

1. Abrukova V.V., Manucharov A.S., Nekotorye osobennosti deformatsii pochv pri reologicheskikh issledovaniyakh (Some characteristics of soil deformation in rheological studies), *Pochvovedenie*, 1985, No. 6, pp. 89–96.
2. Abrukova V.V., Manucharov A.S., Reologicheskaya kharakteristika tundrovoi poverkhnostno-gleevoi pochvy (Rheological characteristics of tundra surface gleyic soil), *Pochvovedenie*, 1986, No. 9, pp. 44–52.
3. Abrukova L.P., Kinetika protsessov tiksotropnogo strukturoobrazovaniya v pochvennykh suspenziyakh (Kinetics of thixotropic structure formation processes in soil suspensions), *Pochvovedenie*, 1970, No. 3, pp. 104–114.
4. Abrukova L.P., Reopeksiya pri reologicheskikh issledovaniyakh pochv 9 Rheopexy in rheological studies of soils), *Pochvovedenie*, 1976, No. 5, pp. 121–126.
5. Abrukova L.P., Izuchenie tiksotropnykh svoystv pochv s primeneniem rotatsionnogo viskozimetra RV-8 (Study of thixotropic properties of soils with a rotational viscometer RV-8), *Pochvovedenie*, 1980, No. 8, pp. 83–91.
6. Volarovich M.P., Lazovskaya N.V., Rotatsionnye viskozimetry dlya issledovaniya reologicheskikh svoystv dispersnykh sistem i vysokomolekulyarnykh soedinenii (Obzor) (Rotational viscometers for studying the rheological properties of dispersed systems and high-molecular compounds (Review)), *Kolloidnyi zhurnal*, 1966, Vol. 28, No. 2, pp. 198–213.
7. Voronin A.D., *Strukturno-funktsional'naya gidrofizika pochv* (Structural-functional hydrophysics of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1984, 204 p.
8. Vyalov S.S., *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* (Rheological concepts of soil mechanics), Moscow: Vysshya shkola, 1978, 447 p.
9. GOST 12248.1-2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti metodom odnoplосkostnogo srezа (Soils. Determination of strength parameters by shear strength testing), Moscow: Standartinform, 2020, 20 p.
10. GOST 12248.3-2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti i deformiruemosti metodom trekhnosnogo szhatiya (Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing), Moscow: Standartinform, 2020, 33 p.

11. GOST 12248.4-2020. *Grunty. Opredelenie kharakteristik deformiruемости методом kompressionnogo szhatiya* (Soils. Determination of deformation parameters by compression testing), Moscow: Standartinform, 2020, 19 p.
12. GOST 5180-2015. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* (Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics), Moscow: Standartinform, 2019, 24 p.
13. Kachinskii N.A., *Fizika pochvy* (Soil physics), Moscow: Vysshaya shkola, 1965, 321 p.
14. Klyueva V.V., *Reologicheskie svoystva pochv i ikh svyaz' s fizicheskimi i khimicheskimi svoystvami na primere dernovo-podzolistoi pochvy i chernozema tipichnogo: Dis. ... kand. biol.nauk* (Rheological properties of soddy-podzolic soils and typical chernozems and their relationships with physical and chemical properties, Cand. biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 2019, 142 p.
15. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Rheological properties of natural and disturbed structure samples of soddy-podzolic and agro soddy-podzolic soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, No. 89, pp. 21–35, DOI: [10.19047/0136-1694-2017-89-21-35](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-89-21-35).
16. Klyueva V.V., Khaydapova D.D., Possibilities of using rheological parameters as physical indicators of soil structural changes, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, V. 103, pp. 108–148, DOI: [10.19047/0136-1694-2020-103-108-148](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-108-148).
17. Manucharov A.S., Kharitonova G.V., Shein E.V., *Reologiya v pochvovedenii* (Rheology in soil science), Moscow: Universitetskaya kniga, 2013, 80 p.
18. Manucharov A.S., *K ispol'zovaniyu reologicheskikh issledovaniy v pochvovedenii* (Using of rheological studies in soil science), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya Pochvovedenie*, 1983, No. 3, pp. 36–40.
19. Manucharov A.S., Abrukova V.V., *Strukturno-mekhanicheskie svoystva dernovo-podzolistoi pochvy* (Structural and mechanical properties of a soddy-podzolic soil), *Pochvovedenie*, 1983, No.4, pp. 64–73.
20. Maslov N.N., *Osnovy mekhaniki gruntov i inzhenernoi geologii* (Fundamentals of soil mechanics and engineering geology), Moscow: Vyssh.shkola, 1968, 631 p.
21. Meschyan S.R., *Mekhanicheskie svoystva gruntov i laboratornye metody ikh opredeleniya (s uchedom vremennykh effektov)* (Mechanical properties of soils and laboratory methods for their determination (taking into account temporary effects)), Moscow: Nedra, 1974, 192 p.
22. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rumyantseva N.A., *Mikrostruktura glinistyykh porod* (Microstructure of clayey rocks), Moscow: Nedra, 1989, 211 p.

23. Rebinder P.A., *Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika. Izbrannnye Trudy* (Surface phenomena in disperse systems. Physico-chemical mechanics. Selected studies), Moscow: Nauka, 1979, 384 p.
24. Sergeev E.M., Golodkovskaya G.A., Ziangirov R.S., Osipov V.I., Trofimov V.T., *Gruntovedenie* (Soil Science), Izdanie tret'e, pererabatatnoe i dopolnennoe, Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta., 1971, 595 p.
25. Shein E.V., Karpachevskii L.O. (Eds), *Teoriya i metody fiziki pochv: kollektivnaya monografiya* (Theory and methods of soil physics: collective monograph), Moscow: Grif i K., 2007, 616 p.
26. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskii E.A., Golodkovskaya G.A., Vasil'chuk Yu. K., Ziangirov R.S, *Gruntovedenie* (Soil Science), Moscow: Izd-vo MGU, 2005, 1024 p.
27. Khaidapova D.D., Kholopov, Yu.V., Zaboeva, I.V., Lapteva, E.M., Reologicheskie osobennosti koagulyatsionnoi struktury severotaezhnykh torfyanisto-podzolisto-gleevatykh pochv evropeiskogo severo-vostoka (Rheological features of the coagulation structure of northern taiga peaty-podzolic-gleyic soils of the European Northeast), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2014, No. 1, pp. 20–25.
28. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovskii E.Yu., Reologicheskie svoystva chernozemov tipichnykh (Kurskaya oblast') pri razlichnom zemlepol'zovanii (Rheological properties of typical chernozems (Kursk oblast) under different land uses), *Pochvovedenie*, 2016, No. 8, pp. 955–963, DOI: [10.7868/S0032180X16080049](https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049).
29. Khitrov N.B., Khaidapova D.D., Vyazkouprugoe povedenie vertikovogo solontsa Kamennoi Stepi (Viscoelastic Behavior of Vertic Solonetz in the Kamennaya Steppe), *Pochvovedenie*, 2019, No. 7, pp. 843–858, DOI: [10.1134/S0032180X19070050](https://doi.org/10.1134/S0032180X19070050).
30. Kholopov Yu.V., Khaidapova D.D., Lapteva E.M., Reologicheskie svoystva severo-taezhnykh avtomorfnykh i polugidromorfnykh kriometamorficheskikh pochv Evropeiskogo severo-vostoka Rossii (Respublika Komi) (Rheological properties of northern taiga automorphic and semi-hydromorphic cryometamorphic soils of the European north-east of Russia (Komi Republic)), *Pochvovedenie*, 2018, No. 4, pp. 439–450, DOI: [10.7868/s0032180x18040056](https://doi.org/10.7868/s0032180x18040056).
31. Tsytoich N.A., *Mekhanika gruntov* (Soil mechanics), Leningrad, Moscow: Stroiizdat, Narkomstroï, 1940, 388 p.
32. Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (Soil physics), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2005, 432 p.

33. Shramm G., *Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii* (Basics of practical rheology and rheometry), V.G. Kulichikhin (Ed.), Moscow: KolosS, 2003, 312 p.
34. Ajayi A.E., Holthusen D., Horn R., Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils, *Soil Tillage Research*, 2016, Vol. 155, pp. 166–175.
35. Ajayi A.E., Horn R., Biochar-induced changes in soil resilience: Effects of soil texture and biochar dosage, *Pedosphere*, 2017, Vol. 27, pp. 236–247.
36. Andrews S.S., Karlen D.L., Cambardella C.A., The Soil Management Assessment Framework, *Soil Science Society of America Journal*, 2004, Vol. 68, No. 6, pp. 1945–1962, DOI: [10.2136/sssaj2004.1945](https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945).
37. Anton Paar GmbH. Modular Compact Rheometers. Products, 2023, URL: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rheometer-mcr-102-302-502/?sku=241353>.
38. Barré P., Hallett P.D., Rheological stabilization of wet soils by model root and fungal exudates depends on clay mineralogy, *European Journal of Soil Science*, 2009, Vol. 60, pp. 525–538, DOI: [10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01151.x).
39. Batista R.F., Reichert J. M., Holthusen D., Batistão A.C., Daher M., Schünemann A.L., Filho E.I.F., Schaefer C.E.G.R., Francelino M.R., Freeze–thaw cycles affecting rheological properties of Antarctic soils, *Geoderma*, 2022, Vol. 428, DOI: [10.1016/j.geoderma.2022.116220](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116220).
40. Batistão A.C., Holthusen D., Reichert J. M., dos Santos L.A.C., Campos M.C.C., Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil, *Geoderma*, 2020, Vol. 363, pp. 114130, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114130](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130).
41. Baumgarten W., Dörner J., Horn R., Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile, *Soil & Tillage Research*, 2013, Vol. 129, pp. 48–60, DOI: [10.1016/j.still.2013.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.007).
42. Baumgarten W., Horn R. Assessing soil degradation by using a scale-spanning soil mechanical approach: A review, In: *Advances in GeoEcology – Soil Degradation*, Catena Verlag, 2013, pp. 3–61.
43. Czubulya Z., Tombacz E., Szegi T., Micheli E., Zsolnay A., Standard state of soil dispersion, *Applied Clay Science*, 2010, Vol. 48, pp. 594–601.
44. Das B.M., *Advanced Soil Mechanics*, CRC Press, 2008, 594 p.
45. *Encyclopedia of agrophysics*, J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec (Eds), Dordrecht: Springer, 2011, 1028 p.
46. 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, pp. 624–637, DOI: [10.2136/sssaj2001.653624x](https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653624x).

47. Holthusen D., Batistão A.C., Reichert J.M., Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content, *Rheological Acta*, 2020, Vol. 59, No. 8, pp. 545–563, DOI: [10.1007/s00397-020-01219-3](https://doi.org/10.1007/s00397-020-01219-3).
48. Holthusen D., Jänicke M., Peth S., Horn R., Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments: I. Mesoscale capacity and intensity parameters, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012a, Vol. 175, No. 1, pp. 4–13, DOI: [10.1002/jpln.201100075](https://doi.org/10.1002/jpln.201100075).
49. 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*, 2012b, Vol. 175, pp. 14–23, DOI: [10.1002/jpln.201100076](https://doi.org/10.1002/jpln.201100076).
50. Holthusen D., Pértile P., Awe G.O., Reichert J.M., Soil density and oscillation frequency effects on viscoelasticity and shear resistance of subtropical Oxisols with varying clay content, *Soil Tillage Research*, 2020, Vol. 203, pp. 104677, DOI: [10.1016/j.still.2020.104677](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104677).
51. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R., Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses, *Geoderma*, 2017, Vol. 295, pp. 129–141, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.01.034](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.034).
52. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R., Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions, *Soil Tillage Research*, 2019, Vol. 191, pp. 282–293, DOI: [10.1016/j.still.2019.04.014](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.014).
53. Holthusen D., Peth S., Horn R., Kühn T., Flow and deformation behavior at the microscale of soils from several long-term potassium fertilization trials in Germany, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, Vol. 175, pp. 535–547, DOI: [10.1002/jpln.201100073](https://doi.org/10.1002/jpln.201100073).
54. Horn R., Holthusen D., Dörner J., Mordhorst A., Fleige H., Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? *Soil & Tillage Research*, 2019, Vol. 195, pp. 104388, DOI: [10.1016/j.still.2019.104388](https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104388).
55. Hosseinpour-Ashenaabad R., Keller T., Larsbo M., Hallett P.D., Dual-platform micromechanical characterization of soils: Oscillation shear rheometry and spherical indentation, *Soil Tillage Research*, 2022, Vol. 223, pp. 105467, DOI: [10.1016/j.still.2022.105467](https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105467).
56. ISO 17892-12:2018 (eng). *Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 12: Determination of liquid and plastic limits.*

57. Keedwell M.J., *Rheology and Soil Mechanics*, London, New York: MacMillan, 1984, 323 p.
58. Lal R., Soil Structure and Sustainability, *Journal of Sustainable Agriculture*, 1991, Iss. 4, pp. 67–92, DOI: [10.1300/J064v01n04_06](https://doi.org/10.1300/J064v01n04_06).
59. Markgraf W., Horn R., Rheological-stiffness analysis of K+-treated and CaCO₃-rich soils, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, Vol. 169, pp. 411–419, DOI: [10.1002/jpln.200521934](https://doi.org/10.1002/jpln.200521934).
60. Markgraf W., Horn R., Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive Scan Analyses and Rheological Investigations of South-Brazilian Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 2007, Vol. 71, pp. 851–859, DOI: [10.2136/sssaj2006.0231](https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0231).
61. 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, Vol. 91, pp. 1–14, DOI: [10.1016/j.still.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.007).
62. Markgraf W., Moreno F., Horn R., Quantification of Microstructural Changes in Salorthidic Fluvaquents Using Rheological and Particle Charge Techniques, *Vadose Zone Journal*, 2012, Vol. 11, pp. 1–11, DOI: [10.2136/vzj2011.0061](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0061).
63. Markgraf W., Watts C., Whalley R., Horn R., Influence of mineralogical compounds and organic matter on rheological properties: Classifying stiffness degradation in soils, *Extended Abstracts – 21st Australian Clay Minerals Conference*, Brisbane, 2010, pp. 121–124.
64. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R., Influence of organic matter on rheological properties of soil, *Applied Clay Science*, 2012, Vol. 64, pp. 25–33, DOI: [10.1016/j.clay.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.009).
65. Mezger T.G., *The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers*, Hanover: Vincentz Network, 2014.
66. Mitchell J.K., Soga K., *Fundamentals of soil behavior*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2005, 577 p.
67. Naveed M., Brown L.K., Raffan A.C., George T.S., Bengough A.G., Roose T., Sinclair I., Koebernick N., Cooper L., Hackett C.A., Hallett P.D., Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time, *Eurasian Journal of Soil Science*, 2017, Vol. 68(6), pp. 806–816, DOI: [10.1111/ejss.12487](https://doi.org/10.1111/ejss.12487).
68. Pértile P., Holthusen D., Gubiani P.I., Reichert J.M., Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities, *Scientia Agricola*, 2018, Vol. 75, No. 2, pp. 154–162, DOI: [10.1590/1678-992X-2016-0267](https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0267).
69. Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., da Costa A., Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils,

Revista Brasileira de Ciencia do Solo, 2016, Vol. 40, pp. 2–14, DOI: [10.1590/18069657rbcs20150286](https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150286).

70. Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., Vogel H.-J., Soil structure as an indicator of soil functions: A review, *Geoderma*, 2018, Vol. 314, pp. 122–137, DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.11.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009).

71. Sobucki V., Holthusen D., Batistão A.C., Mota J.C.A., Reichert J.M., Potential of rheometry in detecting cohesive soils in Brazil as an additional tool to morphological field description and tensile resistance quantification, *Geoderma Regional*, 2022, Vol. 30, pp. e00553, DOI: [10.1016/j.geoderma.2022.e00553](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.e00553).

72. Stoppe N., Horn R., Microstructural strength of tidal soils - A rheometric approach to develop pedotransfer functions, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018, Vol. 66, pp. 87–96, DOI: [10.1515/johh-2017-0031](https://doi.org/10.1515/johh-2017-0031).

73. Suklje L., *Rheological aspects of soil mechanics*, London: Wiley Interscience, 1969, 590 p.

74. Tanner R.I., *Engineering rheology*, Oxford University Press: New York, 2000, 559 p.

75. Tarchitzky J., Chen Y., Polysaccharides and pH effects on sodium montmorillonite: flocculation, dispersion, and rheological properties, *Soil Science*, 2002, Vol. 167, pp. 791–801.

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

77. Vogel H.J., Balseiro-Romero M., Kravchenko A., Otten W., Pot V., Schlüter S., Weller U., Baveye P.C., A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions, *European Journal of Soil Science*, 2021, Vol. 73, pp. 1–14, DOI: [10.1111/ejss.13152](https://doi.org/10.1111/ejss.13152).

78. Vyalov S.S., *Rheological fundamentals of soil mechanics*, Development in geotechnical engineering, Elsevier: Amsterdam, 1986, 560 p.

79. Yudina A., Kuzyakov Y., Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores, *Geoderma*, 2023, Vol. 434, DOI: [10.1016/j.geoderma.2023.116478](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478).