

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ КАК ОДНА ИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ РАСТЕНИЙ

Д. Д. Хайдапова, А. В. Мищенко, Д. В. Карпова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения,
119234, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 12;
E-mail: dkhaydapova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 09 сентября 2021 г., принята к печати 24 февраля 2022 г.

Физические свойства почв как характеристика среды обитания растений чрезвычайно важны, поскольку они обеспечивают оптимальные для роста и развития растений водный и воздушный режимы. Оптимальные физические условия для растений создает агрономически ценная структура, традиционные методы оценки которой основаны на определении соотношения количества агрономически ценных (10–0,25 мм) и неценных (>10 мм и <0,25 мм) агрегатов. Однако данный подход не позволяет оценивать структуру почв при помощи прочностных характеристик, которые являются основными для структурированных тел. Реологический подход позволяет оценить прочность структуры почв как результат межчастичного взаимодействия в зависимости от множества факторов (влажности, содержания органического вещества и др.). В данной работе представлены результаты определения реологических свойств агросерых почв Владимирского Ополья и агрочернозема Курской области с помощью метода амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria). Несмотря на то, что обе исследованные почвы характеризуются коэффициентом структурности, свидетельствующим об отличном агрегатном состоянии, сравнение их реологических свойств позволило выявить существенные различия в реологическом поведении. Так, диапазон упругого поведения при приложении деформационных усилий у чернозема значительно больше, чем у агросерой почвы, что свидетельствует о лучшей устойчивости чернозема к механическим нагрузкам. Однако прочность межчастичных связей у агросерой почвы выше, чем у чернозема. Величина предела текучести, или величина деформационных усилий, при которой почвенная структура переходит из пластичного состояния в текучее, у чернозема существенно выше, чем у агросерой почвы. Результаты исследования свидетельствуют, что реологическая характеристика почв является надежным диагностическим показателем физического состояния почвы как среды обитания растений.

Ключевые слова: структура почв, почвенные агрегаты, реология, амплитудная развертка.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS AS ONE OF THE CHARACTERISTICS OF PLANT PHYSICAL HABITAT

D. D. Khaidapova, A. A. Mishchenko, D. V. Karpova

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science,
1/12, Leninskiye Gory, Moscow, 119234, Russia;
E-mail: dkhaydapova@yandex.ru*

The physical properties of soils as a characteristic of plant habitat are extremely important, since they provide optimal water and air conditions for the growth and development of plants. The optimal physical conditions for plants are provided by an agronomically valuable structure, which traditional assessment methods are based on determining the ratio of the content of agronomically valuable (10-0.25 mm) and non-valuable (>10 mm and <0.25 mm) aggregates. However, this approach does not allow assessing the structure of soils using strength characteristics, which are the main parameters for structured bodies. The rheological approach makes it possible to assess the strength of the soil structure as a result of interparticle interaction depending on many factors (humidity, organic matter content, etc.). This paper presents the results of determining the rheological properties of an agro-gray soil of the Vladimir Opolye and agrochernozem of the Kursk region by the amplitude sweep method on an MCR-302 rheometer (Anton Paar, Austria). Despite the fact that both studied soils were characterized by a structural coefficient indicating an excellent state of aggregation, a comparison of their rheological properties revealed significant differences in rheological behavior. Thus, the range of elastic behavior of the chernozem under the application of deformation forces was much larger compared to the agro-gray soil, which indicated a better resistance of the chernozem to mechanical loads. However, the strength of interparticle bonds in the agro-gray soil was higher than in the chernozem. The value of the yield strength, or the value of deformation forces, at which the soil structure passes from a plastic state to a fluid state, was significantly higher for the chernozem than for the agro-gray soil. The results of the study indicate that the rheological characteristics of soils are a reliable diagnostic indicator of the physical state of the soil as a plant habitat.

Key words: soil structure, soil aggregates, rheology, amplitude sweep.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физических факторов в жизни растений как основная задача агрофизики была сформулирована классиками почвоведения К. А. Тимирязевым, В. Р. Вильямсом, В. В. Докучаевым, П. А. Костычевым, А. А. Измаильским, А. Г. Дояренко, А. И. Воейковым, Н. И. Вавиловым (Усков, 2017). Физические свойства почвы как среды обитания растений чрезвычайно важны, так как они обеспечивают оптимальные для роста и развития растений водный и воздушный режимы. Почва с высокой пористостью, большими размерами пор и меньшей плотностью активнее регулирует физические и биологические процессы, чем микроагрегатная или бесструктурная почва (Вершинин, 1958, 1959). Оптимальные физические условия для растений создает агрономически ценная структура, традиционные методы оценки которой основаны на определении соотношения количества агрономически ценных (10–0,25 мм) и неценных (>10 мм и <0,25 мм) агрегатов. Однако данный подход не позволяет оценивать структуру почв при помощи прочностных характеристик, которые являются основными для структурированных тел. Устойчивость почвенной структуры к различным механическим и водным воздействиям позволяет ей в течение длительного времени сохранять оптимальную плотность сложения, обеспечивая условия для благоприятного роста и развития корневых систем растений. Исследования С. И. Зинченко (2015) показали, что в целом масса корневой системы яровой пшеницы и озимой ржи обратно пропорциональна плотности сложения пахотного слоя. В агросерой почве Владимирского Ополья глубина проникновения корней зерновых культур в пахотные и подпахотные слои почвы достигала 150 см, однако их масса зависела от плотности почвы после посева и достигала наибольших значений в слое 20–22 см (Зинченко, 2015). Однако исследований, посвященных изучению устойчивости почвенной структуры к механическим воздействиям, т. е. ее способности противостоять разрушающим действиям тяжелой почвообрабатывающей техники, крайне мало. Реологические свойства как характеристика прочности образующихся межчастичных связей могут служить надежным диагностическим признаком устойчивости почвенной структуры к разрушающим механическим и водным воздействиям, а также являться показателем оптимальных для роста и развития корневых систем растений физических условий.

Целью данной работы явилось сопоставление реологических характеристик двух типов почв с оптимальными структурными свойствами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили пахотные горизонты агросерой тяжелосуглинистой почвы на покровных суглинках опытного поля адаптивно-ландшафтных систем земледелия ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ» (Владимирское Ополье) (Phaeozem albic, WRB 2014 г., версия 2015 г.) и агрочернозема миграционно-мицеллярного

тяжелосуглинистого на карбонатном лессовидном суглинке опытного поля Курского НИИАП (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), WRB 2014 г., версия 2015 г.).

Гранулометрический состав почв определялся методом седиментации (Вадюнина, Корчагина, 1986), содержание углерода – на экспресс-анализаторе АН-7529 («Измеритель», г. Гомель, Беларусь) методом сухого сжигания в потоке кислорода (Шейн и др., 2017), распределение агрегатов по размерам устанавливалось путем рассеивания на ситах при помощи метода Савинова. Реологические свойства определены с помощью метода амплитудной развертки на реометре MCR-302 (Anton Paar, Австрия) (Шейн и др., 2017). Теоретические аспекты данного метода более подробно представлены в монографии Т. G. Mezger (Mezger, 2011) и работах (Markgraf, 2006; Хайдапова и др., 2016). Суть метода заключается в том, что исследуемый образец подвергается амплитудным колебаниям в осцилляционном режиме. При испытаниях определяются вязкая и упругая реакции образца в зависимости от скорости воздействия на него осциллирующего напряжения или деформации от заданной угловой скорости или частоты. Проведение испытаний на реометре подразумевает, что верхняя плита не вращается с постоянной скоростью в одном направлении, а совершает движение по гармоническому закону, попеременно отклоняясь от плоскости на малый угол $\pm\phi$. Это вызывает аналогичную деформацию образца, помещенного в измерительный зазор, и соответствующие изменения напряжений, амплитуда которых связана с природой испытываемого образца (Mezger, 2011). Напряжение сдвига τ равно силе F , деленной на площадь A :

$$\pm\tau [Pa] = \pm F / A,$$

деформация:

$$\pm\gamma = \pm s / h = \pm \tan \varphi,$$

где s – расстояние отклонения; h – расстояние между двумя плитами.

Связь между скоростью сдвига и деформацией сдвига:

$$\dot{\gamma} = \gamma_A \cdot \omega,$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига [с^{-1}]; γ_A – амплитуда деформации [%]; ω – угловая частота [с^{-1}] (Mezger, 2011).

Формально деформация может быть представлена как:

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

где γ_A – амплитуда деформации (%); ω – угловая частота в рад с^{-1} или с^{-1} (Mezger, 2011).

Технические параметры проведения испытаний: количество точек измерения – 30, длительность измерения одной точки – 15 с, угловая частота измерения – 0,5 Hz, диапазон деформации (напряжения) γ – от 0,001 до 100% lg (Mezger, 2011), контроль нормальной силы NF (силы воздействия верхнего плато) <5 N, постоянная температура 20°C обеспечивалась элементами Пельтье. Измерениям подвергались почвенные образцы, растертые резиновым пестиком и просеянные через сито 1 мм. 3 г почвенной массы капиллярно увлажнялись в течение

суток на мокрой фильтровальной бумаге. Все определения проведены в трехкратной повторности. Статистическая обработка экспериментальных результатов выполнена в программе Excel. Были измерены и проанализированы следующие реологические параметры: диапазон линейной вязкоупругости, или область упругих деформаций, определяемая двумя показателями – деформацией и значением модуля упругости, характеризующим жесткость межчастичных связей в образце, а также значение деформации в точке пересечения кривых модулей упругости и вязкости, которое указывает на разрушение почвенной структуры. До пересечения

модулей почва показывает необратимое деформационное поведение (пластичное поведение), после поведение почвы переходит от вязкоупругого к вязкому (Markgraf, 2006; Хайдапова, 2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По гранулометрическому составу и содержанию органического вещества исследуемые почвы несущественно отличаются друг от друга и представляют собой тяжелосуглинистые почвы (табл. 1).

В табл. 2 представлены данные о распределении агрегатов по размерам (структурный анализ, метод Савинова).

Таблица 1. Некоторые свойства агросерой почвы и агрочернозема

Почва	Горизонт, глубина	Гранулометрический состав		Содержание органического углерода, %
		ил (<0,001 мм), %	физ. глина (<0,01 мм), %	
Агросерая почва	Ап (0–20 см)	21	43	2,99
Агрочернозем	Ап (0–20 см)	23	49	2,55

Таблица 2. Распределение агрегатов по размерам, %

Почва	Горизонт, глубина	Размер фракций, мм								
		>10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	<0,25
Агросерая почва	Ап (0–20 см)	9,58	7,96	7,11	12,06	4,52	19,61	23,14	8,62	6,22
Агрочернозем	Ап (0–20 см)	6,7	4,05	4,51	7,17	8,39	16,45	18,62	13,97	9,8

Коэффициент структурности как отношение суммы агрономически ценных агрегатов к сумме агрегатов >10 мм и <0,25 мм для агросерой почвы составил 5,25, для агрочернозема – 4,43. Согласно данному показателю, обе почвы имеют отличную структуру. Распределение агрегатов по размерам в исследуемых почвах является оптимальным,

наибольшее количество агрономически ценных агрегатов имеет размер 2–0,5 мм, содержание глыбистой и мелкодисперсной фракций <0,25 мм является незначительным.

На рисунке представлены результаты определения реологических свойств исследуемых почв.

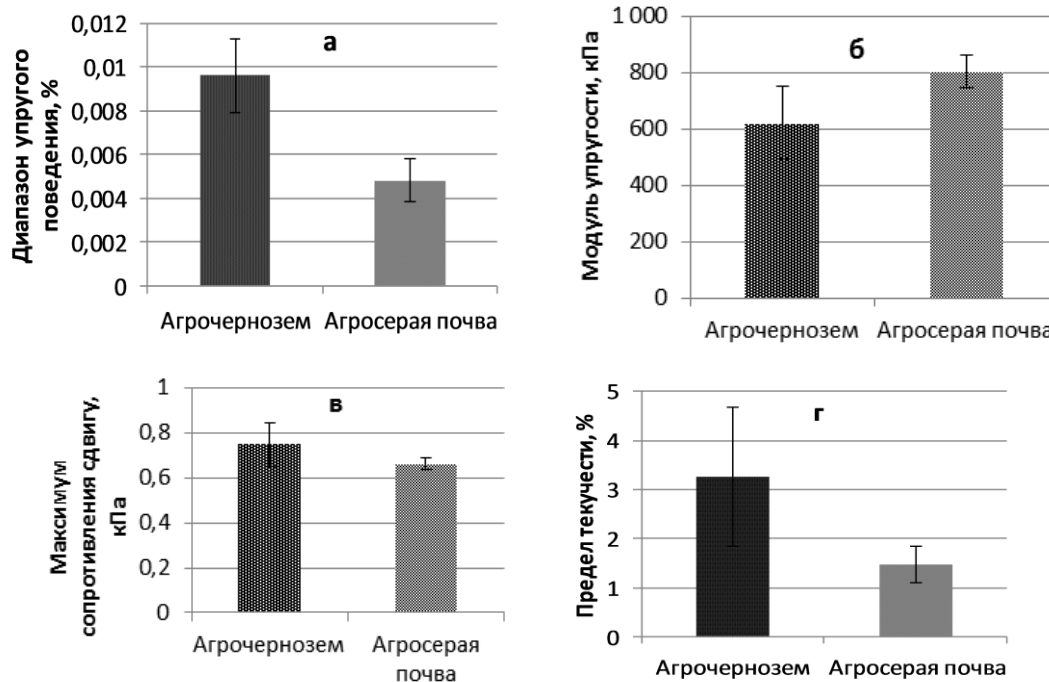


Рис. Характеристики реологического поведения исследуемых почв:

а – диапазон упругого поведения; б – модуль упругости; в – максимум сопротивления сдвигу; г – предел текучести

Диапазон упругого поведения почвенных паст агрочернозема существенно выше по сравнению с агросерой почвой (рис. 1а), что свидетельствует о более высокой устойчивости агрочернозема к деформационным изменениям под влиянием механических нагрузок. Модуль упругости (или прочность межчастичных связей до деформационных изменений) агросерой почвы составляет 800 кПа, агрочернозема – 600 кПа (рис. 1б). Величина максимального сопротивления сдвигу у агросерой почвы незначительно выше, чем у агрочернозема (рис. 1в). Процент деформации, при которой осуществляется переход в текучее состояние, для агрочернозема составляет 3%, а для агросерой почвы – 1,5% (рис. 1г). Агросерая почва теряет структурную связность в два раза быстрее, чем агрочернозем. Возможно, причина неодинакового реологического поведения заключается в различии поверхностных свойств твердой фазы почв. Очевидно, что поверхностная активность твердой фазы агросерой почвы выше, чем агрочернозема (модуль упругости агросерой почвы больше модуля упругости агрочернозема). Диапазон пластичного поведения при этом существенно меньше. Пластичное поведение – это возможность частиц смещаться относительно друг друга без разрыва сплошности. Вероятно, капиллярная поровая сеть, заполненная влагой, в черноземе значительно шире, чем в агросерой почве, что позволяет почвенным частицам чернозема смещаться относительно друг друга при деформационных нагрузках в течение более длительного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурообразование в почвах в значительной степени зависит от поверхностных свойств твердой фазы почв. В лабораторных реологических исследованиях анализу подвергаются почвенные пасты в состоянии суточного капиллярного увлажнения, в течение которого почвенные частицы вступают во взаимодействие, образуя в основном коагуляционные связи через прослойки влаги. Полученные экспериментальные данные демонстрируют способность поверхности твердой фазы почв образовывать межчастичные связи той или

иной прочности в зависимости от свойств твердой фазы. Распределение почвенных агрегатов по размеру – это результат естественных многолетних процессов интеграции и разинтеграции почвенных частиц в результате увлажнения и иссушения, замерзания и оттаивания, которые также зависят от поверхностных свойств твердой фазы почв. Результаты реологических исследований почвенных паст свидетельствуют о потенциальной способности почв к образованию структур. Однако необходимо проводить исследования реологических свойств естественных структурных образований (почвенных агрегатов) или образцов ненарушенной структуры (монолитов).

Несмотря на то, что, согласно результатам агрегатного анализа, исследуемые почвы характеризовались отличным структурным состоянием, реологические исследования позволили выявить существенные различия в их функциональных свойствах. Агросерые почвы обладают меньшей устойчивостью к нагрузкам (диапазон упругого поведения) по сравнению с агрочерноземами и в два раза быстрее переходят в вязкотекучее состояние при деформационных нагрузках, что может свидетельствовать о подверженности агросерых почв эрозионным процессам. Реологические свойства как характеристика прочности образующихся межчастичных связей могут служить надежным диагностическим признаком устойчивости почвенной структуры к разрушающим механическим и водным воздействиям и показателем физического состояния среды обитания корневых систем растений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ.

Работа частично выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А21-121012290189-8 «Научно-практические основы и информационное обеспечение устойчивого управления почвенно-земельными ресурсами Европейской части РФ»).

Список литературы

- Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- Вершинин П. В. Почвенная структура и условия ее формирования. М.-Л., 1958. 189 с.
- Вершинин П. В. Твердая фаза почвы как основа ее физического режима. Основы Агрофизики. М., 1959. Ч. II. 910 с.
- Зинченко С. И. Особенности развития корневой системы зерновых культур // Земледелие. 2015. № 6. С. 32–35.
- Усков И. Б., Якушев В. П., Чесноков Ю. В. Управление агробиологическими системами – физико-агрономические и генетико-селекционные аспекты (к 85-летию Агрофизического научно-исследовательского института) // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 429–436.
- Шеин Е. В., Милановский Е. Ю., Хайдапова Д. Д., Поздняков А. И., Тюгай З. Н., Початкова Т. Н., Дембовецкий А. В. Практикум по физике твердой фазы почв: Учебное пособие. М.: Буки Веди, 2017. 119 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. 1–9.
- 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.
- Mezger T. G. The Rheology Handbook. Hanover, Germany, 2011. 436 p.

References

- Vadyunina A. F., Korchagina Z. A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* [Methods for studying the physical properties of soils]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
- Vershinin P. V. *Pochvennaya struktura i usloviya yeye formirovaniya* [The soil structure and the conditions of its formation]. Moscow-Leningrad, 1958, 189 p.
- Vershinin P. V. *Tverdaya faza pochvy kak osnova yeye fizicheskogo rezhima. Osnovy agrofiziki* [The solid phase of the soil as the basis of its physical mode. Fundamentals of Agrophysics]. Moscow, 1959, part II, 910 p.
- Zinchenko S. I. Osobennosti razvitiya kornevoy sistemy zernovykh kul'tur [Features of the development of the root system of grain crops] // *Zemledeliye*, 2015, no. 6, pp. 32–35.
- Uskov I. B., Yakushev V. P., Chesnokov Yu. V. Upravleniye agrobiologicheskimi sistemami – fiziko-agronomicheskiye i genetiko-seleksionnyye aspekty (k 85-letiyu Agrofizicheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta) [Agrobiological systems management – physical-agronomic and genetic-breeding aspects (to the 85th anniversary of the Agrophysical Research Institute)] // *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2017, t. 52, no. 3, pp. 429–436.
- Shein E. V., Milanovskiy E. Yu., Khaydapova D. D., Pozdnyakov A. I., Tyugay Z. N., Pochatkova T. N., Dembovetskiy A. V. *Praktikum po fizike tverdoy fazy pochv: Uchebnoye posobiye* [Practicum on physics of solid phases of soils: Textbook]. Moscow: Buki Vedi, 2017, 119 p.
- Khaydapova D. D., Chestnova V. V., Shein E. V., Milanovskiy E. Yu. Reologicheskiye svoystva chernozemov tipichnykh (Kurskaya oblast') pri razlichnom zemlepol'zovanii [Rheological properties of typical chernozems (Kursk region) under different land use] // *Pochvovedeniye*, 2016, no. 8, pp. 1–9.
- 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.
- Mezger T. G. *The Rheology Handbook*. Hanover, Germany, 2011. 436 p.

УДК 631.4 + 631.58 : 004.9(476)

DOI:10.25695/AGRPH.2022.01.04

**КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНОГО
ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В АГРОЛАНДШАФТАХ БЕЛАРУСИ**

А. Н. Червань

*Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, г. Минск;**Белорусский государственный университет, г. Минск**220019, г. Минск, ул. Маршала Лосика, д. 4-48**E-mail: ChervanAlex@mail.ru**Поступила в редакцию 16 ноября 2021 г., принята к печати 24 февраля 2022 г.*

В статье представлен структурно-функциональный анализ почвенных и агрохимических условий с использованием ГИС, картографически обеспечивающий типовое проектирование систем адаптивно-ландшафтного земледелия в сельскохозяйственных организациях и районах Беларуси. Приведена методика создания пространственной основы для оптимизации элементов системы земледелия по результатам агротехнологической и агроэкологической оценок почвенно-ресурсного потенциала в формате геореляционной базы данных. Представлены результаты геосистемного учета и геостатистической оценки факторов производительной способности почв для целей точного управления адаптивно-ландшафтным земледелием. Почвенные комбинации используются в качестве инварианта состояния почвенно-земельных ресурсов территории. Рассмотрены картометрические параметры состояния геосистем в границах почвенных комбинаций для определения целевого назначения сельскохозяйственных земель и экологически оправданной степени интенсификации их использования. Выполнена оценка неоднородности структуры почвенного покрова с использованием показателей контрастности и расчлененности ареалов почв в комбинации. Агротехнологическая оценка почвенно-земельных ресурсов проведена по существенным агрохимическим показателям и агрофизическим свойствам. Почвенно-ресурсный потенциал рассчитан с учетом поправочных коэффициентов к бонитету почв по результатам агротехнологической и агроэкологической оценок в границах типологических (законмерно повторяющихся) почвенных комбинаций – территориальных единиц адаптивно-ландшафтного земледелия. Описание почвенно-ресурсного потенциала по ключевым территориям с учетом буферности геосистем к антропогенному воздействию позволяет осуществить территориальное планирование на четырех уровнях: регион – район – сельскохозяйственная организация – рабочий участок.

Ключевые слова: агроландшафт, почва, структура почвенного покрова, адаптивно-ландшафтная система земледелия, ГИС, геосистема.