

**Е.В. Шейн, Е.Ю. Милановский, Д.Д. Хайдапова,
А.В. Дембовецкий, З.Н. Тюгай**
Ye.V. Shein, Ye.Yu. Milanovskiy, D.D. Khaydapova,
A.V. Dembovetskiy, Z.N. Tyugay

НОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ: 3D-ТОМОГРАФИЯ, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, КОНТАКТНЫЙ УГОЛ

NEW INSTRUMENTS FOR STUDYING SOIL PHYSICAL PROPERTIES: 3D TOMOGRAPHY, RHEOLOGICAL PROPERTIES, CONTACT ANGLE

Ключевые слова: почва, поровое пространство, 3D-томография, реологические характеристики, контактный угол смачивания.

В почвоведении появились новые аппараты, измеряющие поровое пространство в 3D-изображениях (томография), контактный угол смачивания, реологические характеристики и др. Эти свойства и параметры должны найти свое применение в почвенных исследованиях; рассматриваются данные по соответствующим почвенным параметрам, полученным на новом оборудовании. Новые приборы и методы требуют большой методической работы по установлению и выявлению границ их применимости, оптимальных диапазонов, условий измерений и в целом стандартизации процедур экспериментального определения.

Keywords: soil, soil pore space, 3D-tomography, rheological properties, contact angle.

New instruments to measure pore space in 3D images (tomography), contact angle, rheological properties, etc. has come to be used in soil science. Those properties and measurements should find their application in soil studies; the soil measurement data obtained with the new equipment is discussed. The new instruments and techniques require major methodological efforts to identify the limits of their applicability, the optimal ranges, measurement conditions, and general standardization of experimental determination procedures.

Шейн Евгений Викторович, д.б.н., проф., зав. каф. физики и мелиорации почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-36-84. E-mail: evgeny.shein@gmail.com.

Милановский Евгений Юрьевич, д.б.н., вед. н.с., фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-01-64. E-mail: milanovskiy@gmail.com.

Хайдапова Долгор Доржиевна, к.б.н., доцент, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-36-84. E-mail: dkhaydapova@yandex.ru.

Дембовецкий Александр Владиславович, к.б.н., с.н.с., фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-48-46. E-mail: avd26@yandex.ru.

Тюгай Земфира Николаевна, к.б.н., с.н.с., фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-01-64. E-mail: zemfira53@yandex.ru.

Shein Yevgeniy Viktorovich, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-36-84. E-mail: evgeny.shein@gmail.com.

Milanovskiy Yevgeniy Yuryevich, Dr. Bio. Sci., Assoc. Prof., Leading Staff Scientist, Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-01-64. E-mail: milanovskiy@gmail.com.

Khaydapova Dolgor Dorzhiyevna, Cand. Bio. Sci., Assoc. Prof., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-36-84. E-mail: dkhaydapova@yandex.ru.

Dembovetskiy Aleksandr Vladislavovich, Cand. Bio. Sci., Senior Staff Scientist, Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-48-46. E-mail: avd26@yandex.ru.

Tyugay Zemfira Nikolayevna, Cand. Bio. Sci., Senior Staff Scientist, Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-01-64. E-mail: zemfira53@yandex.ru.

3D-томография. Томография позволяет визуализировать поровое пространство при любой влажности, выделить твердую фазу почвы, особенности её формы и пространственной организации [1]. В отличие от микроморфологических исследований 3D-томография позволяет изучать поровое пространство в ненарушенном виде при любой влажности, наблюдать распределение влаги в твердой фазе почвы при использовании особых пропитывающих веществ. В настоящее время в этой области публикуется большое

количество работ. Основное внимание уделяется описанию структуры порового пространства и применению этого метода для различных разделов почвоведения.

До настоящего времени почвенные гидрологи рассматривали поровое пространство как набор цилиндрических капилляров. Соответственно, для расчета форм влаги и ее передвижения в почве использовали, как основные, уравнения Лапласа и Жюрена. Однако согласно данным 3D-томографии, почвенное поровое пространство совсем

непохоже на равномерно организованные «трубочки-цилиндрики», и капилляры далеко не цилиндрические, они сложным образом взаимосвязаны, что, безусловно, должно сказаться на влагоемкости и влагопроводности почвенной системы (рис. 1) [1]. По-видимому, в ближайшие годы проблема связи строения порового пространства с влаго- и газоёмкостью, влаго- и газо-проводностью будет основной в почвенной гидрологии, физике почв и, вероятно, в почвоведении вообще.

Реологические характеристики почв. Для исследования механических свойств и микроструктуры почвы в последнее время стали активно применяться реологические методы. Они позволяют получить ряд количественных физически обоснованных параметров, с помощью которых становится возможным прогнозировать изменение микроструктуры почвы при нагрузках.

Современные приборы позволяют значительно увеличить точность измерения реологических параметров и их количество. Модульные компактные реометры (MCR) предназначены для решения широкого спектра задач. Для обеспечения высокой точности измерений в них используются моторы с воздушными подшипниками. Аксессуары реометров предназначены для определенных типов почвенных образцов и контроля температуры. Механические и электрические элементы управления собраны в одно устройство. Подвижная измерительная головка обеспечивает достаточное пространство для загрузки и удержания образца. Реометры являются высокочувствительными приборами для измерения межчастичных взаимодействий. Применимость реометров для изучения микроструктуры показана в большом ряде работ [2, 3].

Для исследования вязкоупругих свойств чернозема нами был использован метод ам-

плитудной развертки с измерительной системой параллельных плато на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия). Были исследованы образцы чернозема типичного Центрально-Черноземного заповедника Курской области, отобранные с участка заповедной некосимой степи и длительного пара. Почвенные образцы анализировали в состоянии почвенной пасты (после суточного капиллярного увлажнения). Были определены следующие реологические параметры: 1) G' – модуль упругости (модуль накопления) как составляющая вязкоупругого поведения; 2) G'' – модуль вязкости (модуль потерь), как составляющая вязкоупругого поведения; 3) LVE_range – диапазон линейной вязкоупругости (пределы устойчивости почвенной пасты к разрушению структуры); 4) $G'=G''$ – точка разрушения структуры (точка равенства модулей упругости и вязкости) (рис. 2).

Из рисунка видно, что модуль упругости и диапазон линейной вязкоупругости целинной почвы значительно превышают таковые почвы, подвергающейся постоянной вспашке (G' степи – 10^6 Па и G' пара – 10^5 Па при нулевой деформации; диапазон линейной вязкоупругости целинной почвы распространяется до 0,1% деформации, для пара на порядок меньше – до 0,02% деформации). Разрушение структуры (точка равенства модулей) для целинной почвы наступает при деформации 20%, для почвы длительного пара – при 8% деформации. Полученные данные свидетельствуют о значительной разнице в реологическом поведении исследуемых почв. Наши исследования подтвердили, что реометры являются высокочувствительными приборами для измерения межчастичных взаимодействий, что, безусловно, ставит их в первые ряды по применению в почвоведении для изучения микроструктуры почвы.

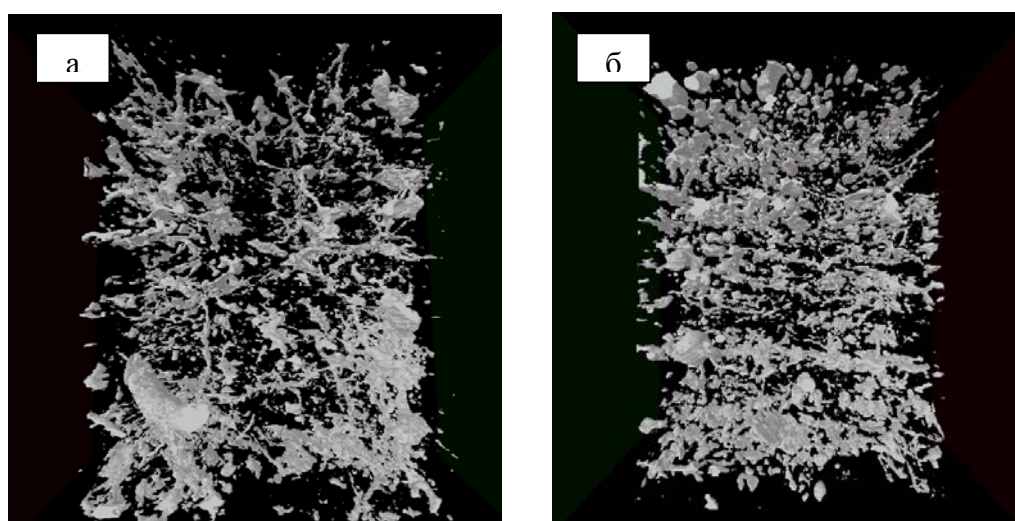


Рис. 1. Томограммы порового пространства (черный цвет – твердая фаза почвы, серый – поровое пространство): а – гор. А2В, б – гор. В дерново-подзолистой почвы ([1], с разрешения авторов)

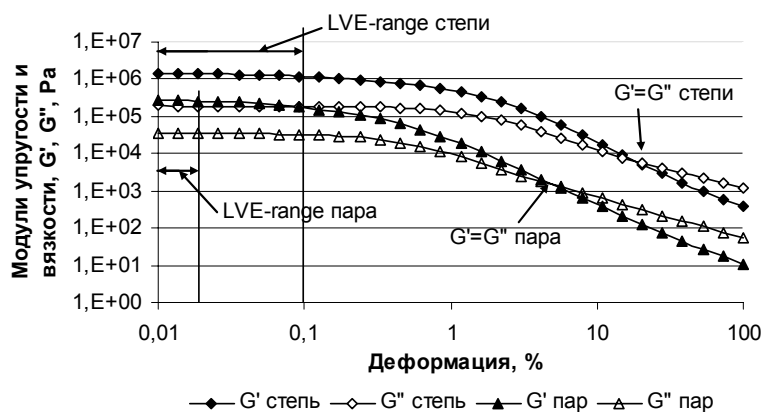


Рис. 2. Реологические кривые модулей упругости и вязкости (пояснения в тексте)

Контактный (краевой) угол смачивания (КУС). Поверхность твердой фазы почвы оказывает большое влияние на взаимодействие, биодоступность и пространственное распределение растворенных веществ и газов в почве. Физические и химические свойства поверхности твердой фазы во многом определяют транспорт и сорбцию/десорбцию растворенных веществ. Множество процессов, идущих в почве, включая инфильтрацию, преимущественные потоки и поверхностный сток, зависят от смачиваемости твердой фазы водой, численно характеризуемой контактным углом смачивания (КУС).

Основным фактором формирования гидрофобно-гидрофильных свойств почвы является органическое вещество (ОВ) почвы. При содержании $C_{орг.} > 2\%$ установлена прямая линейная зависимость между $C_{орг.}$ и краевым углом смачивания. В диапазоне $0 < C_{орг.} < 1\%$ наблюдается экстремальная вариабельность величины контактного угла от 0° до 90° [4]. Причину варьирования степени гидрофобности поверхности авторы связывают с пространственной организацией органических соединений на поверхности минеральных частиц. При низком содержании $C_{орг.}$ гидрофильные группы органических молекул направлены к активным центрам поверхности минеральных частиц. При этом в «плоском» молекулярном слое большинство гидрофобных зон молекул ориентированы наружу. По мере заполнения $C_{орг.}$ гидрофильной минеральной поверхности ее гидрофобность возрастает. С увеличением органической нагрузки пространственная структура молекул ОВ от разреженной плоской ориентации изменяется на плотно вертикальную. При этом снова происходит увеличение смачиваемости поверхности. При высоких отношениях ОВ/минерал внешняя поверхность отдельного «молекулярного слоя» может взаимодействовать «с избыточными» молекулами ОВ, формируя второй молекулярный слой. Внешняя поверхность снова становится гидрофобной.

Из проанализированных нами проб максимальной смачиваемостью обладает песок. Модификация его поверхности пленкой $Fe(OH)_x$ приводит к снижению ее гидрофиль-

ности. Образцы почвы из гумусово-аккумулятивного горизонта чернозема под лесополосой и целинной растительностью обладают минимальной смачиваемостью, которая возрастает как с глубиной, так и в образце чернозема под длительным паром. Данный факт полностью согласуется с известной гипотезой формирования водоустойчивой структуры чернозема [5].

В настоящее время появились специальные приборы и устройства для измерения КУС, в которых используется метод сидячей капли. Этот метод заключается в помещении на ровную поверхность образца капли воды и измерении угла раздела фаз вода-поверхность. Программное обеспечение современного оборудования и видеосъемка позволяют анализировать форму капли на поверхности образца и вычислять значения КУС (рис. 3).

Определение КУС мы проводили методом статической сидячей капли на цифровом угломере (Система Анализа Формы Капли, DSA100, Krüss, Германия), оснащенном видеокамерой и программным обеспечением. Объем капли дистиллированной воды 1,5 мкл, скорость ее вытекания $100-150 \text{ мкм}\cdot\text{с}^{-1}$. Аппроксимацию формы капли проводили методом Лапласа-Юнга. Использовали два способа подготовки образцов к измерению контактного угла. Почву, растертую (резиновый пестик) и просеянную через сито $100-50 \text{ мкм}$, равномерно распределяли на предметном стекле ($2,5 \times 7 \text{ см}$), покрытом двусторонним скотчем или пленкой ацетатного лака. Образец в течение нескольких секунд с усилием около 100 г уплотняли другим предметным стеклом. Аккуратно стряхивали не приклеившиеся частички и вновь прижимали почву предметным стеклом. Съемка производится для воздушно-сухого образца. Для высокодисперсных проб готовят тонкие пленки на предметном стекле $2,5 \times 2,5 \text{ см}$. Полтора миллилитра гомогенизированной водной суспензии образца (1-2%) равномерно распределяют по обезжиренной ацетоном поверхности стекла и высушивают в горизонтальном положении при комнатной температуре двое суток.



Рис. 3. Форма капли воды на гидрофобной (а) и гидрофильной (б) поверхности

Таблица

Аналитические характеристики глинистых минералов

Минерал	Образец	C, %	C/N	S _{N2} [*] , м ² /г	КУС, °
Каолинит	1	0,39	19,5	11,01	30,85
	2	7,82	6,6	6,02	54,5
Монтмориллонит	1	0,42	21,0	49,29	48,4
	2	6,33	4,9	14,03	67,7

Примечание. 1 – исходный; 2 – после инкубации; *удельная поверхность по десорбции азота.

КУС можно определить при воздушно-сухом и абсолютно сухом (после сушки при 105°C) состоянии образцов.

Каолинит и монтмориллонит в течение 2 мес. инкубировались при 25°C с чистой культурой *Bacillus circulans* в среде для культивирования силикатных бактерий. Когда концентрация водорастворимых продуктов метаболизма бактерий достигла постоянного уровня, глинистые минералы были отделены центрифугированием, несколько раз промыты дистиллированной водой и высушены.

Аналитические исследования показали существенную сорбцию, насыщенного азотом, ОВ, на поверхности глинистых минералов после инкубационного эксперимента (табл.).

Сорбция продуктов метаболизма бактерий на поверхности глин вызывает уменьшение величины удельной поверхности (низкотемпературная адсорбция азота) и нивелирует различия в площади поверхности исходных минералов. Измеренные значения КУС исходных форм глинистых минералов свидетельствуют о лучшей смачиваемости поверхности каолинита (табл.). Согласно литературным данным, контактный угол смачиваемости каолинита составляет 27,8°, монтмориллонита – 55,7°. Результатом сорбции продуктов метаболизма на поверхности частиц глинистых минералов является их гидрофобизация.

Закключение

3D-томография, определение реологических характеристик и краевого угла смачивания поверхности твердой фазы являются новыми, малоизученными методами изучения свойств почв. С одной стороны, они чрезвычайно привлекательны по своим возможно-

стям, а с другой, – требуют большой методической работы по установлению и выявлению границ их применимости, оптимальных диапазонов и условий измерений. И, самое главное, необходима стандартизация процедур определения вышеуказанных свойств.

Библиографический список

1. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В. Абросимов К.Н., Герке К.М., Корост Д.В. Компьютерная микротомография в почвоведении // Доклад на Докучаевских чтениях. – СПб., 2014.
2. Khaydapova D., Milanovskiy E.Yu., Shein E.V. 2013. Impact of Anthropogenic Load on Rheological Properties of Typical Chernozems (Kursk Region, Russia). *Soil Degradation, Advances in Geocology* 42, Catena Verlag GMBH Germany, 2013, P. 62-71.
3. Mezger T.G. *The Rheology Handbook*. 2011. 3-rd Revised Edition, Hanover, Germany, P. 436.
4. Markgraf W., R.Horn, S. Peth. 2006. An approach to rheometry in soil mechanic-structural changes in bentonite, clayey and silty soils. *Soil and Tillage Research* 91, P. 1-14.
5. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zol-lars R.L. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2008. – V. 256. – № 1. – P. 299-307.
6. Bachmann J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M-O., Kaiser K., Horn R., Fischer W.R. Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2008, 171, 14-26.

7. Шейн Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. – 2003. – № 1. – С. 53-61.

References

1. Skvortsova E.B., Shein E.V. Abrosimov K.N., Gerke K.M., Korost D.V. Komp'yuternaya mikrotomografiya v pochvovedenii // Doklad na Dokuchaevskikh chteniyakh. – SPb., 2014.

2. Khaydapova D., Milanovskiy E.Yu., Shein E.V. 2013. Impact of Antropogenic Load on Rheological Properties of Typical Chernozems (Kursk Region, Russia). Soil Degradation, Advances in Geoecology 42, Catena Verlag GMBH Germany, 2013, P. 62-71.

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

4. Markgraf W., R.Horn, S. Peth. 2006. An approach to rheometry in soil mechanic-structural changes in bentonite, clayey and silty soils. Soil and Tillage Research 91, P. 1-14.

5. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zol-lars R.L. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids // Journal of Colloid and Interface Science. – 2008. – V. 256. – No. 1. – P. 299-307.

6. Bachmann J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M-O., Kaiser K., Horn R., Fischer W.R. Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008, 171, 14-26.

7. Shein E.V., Milanovskii E.Yu. Rol' i zna-chenie organicheskogo veshchestva v obrazovanii i ustoichivosti pochvennykh agregatov // Pochvovedenie. – 2003. – № 1. – S. 53-61.



УДК 631.4

А.Э. Вайгель, А.Б. Умарова, М.М. Сусленкова, Т.Н. Початкова
A.E. Vaigel, A.B. Umarova, M.M. Suslenkova, T.N. Pochatkova

**ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ТВЕРДОФАЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ
 ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПЕРВЫЕ ГОДЫ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

**CHANGE OF PROPERTIES OF SOLID-PHASE COMPONENTS OF SOIL CONSTRUCTIONS DURING
 THE FIRST YEARS OF THEIR FUNCTIONING**

Ключевые слова: почвенные конструкции, физические свойства и режимы почв, городское озеленение, гранулометрический состав.

Формирование целевых почвенных конструкций разного назначения, как правило, сопряжено с использованием почвенных слоев и горизонтов разного генезиса. Рабочей гипотезой является то, что объединенные в единую систему они в процессе их функционирования подвергаются быстрой трансформации. Причем, изменения касаются свойств не только быстроизменяемых фаз, но и медленно изменяющейся твердой фазы почв. Подобная эволюция почвенных конструкций ведет к их деградации. Создание устойчивых почвенных конструкций является важной проблемой их устойчивого использования. Для изучения трансформации свойств конструкторов на почвенном стационаре МГУ им. М.В. Ломоносова были созданы различные варианты почвенных конструкций. Установлено, что специфика строения почвенного

профиля существенно влияет на рост и развитие травянистых растений. Обнаружены изменения в свойствах твердофазных компонентов.

Keywords: soil constructions, soil physical properties and regimes, urban greening, particle-size composition.

The main feature of greenerring in urban areas is to create a visually pleasant green cover of the territory, consisting mainly of herbaceous plants. However, due to unfavorable environmental conditions in cities, for stable existence of those plants it is necessary to create specialized soil constructions. To study the transformation of constructed soil properties, different soil constructions were created at the Soil Station of Lomonosov Moscow State University. It was found that the structural features of the soil profile affected significantly the growth and development of plants. The changes of properties of solid-phase components were revealed.

Вайгель Анастасия Эдуардовна, аспирант, каф. физики и мелиорации почв, фак-т почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Тел.: (495) 939-25-42. E-mail: n.vaigel@gmail.com.

Vaigel Anastasiya Eduardovna, Post-Graduate Student, Soil Physics and Reclamation Dept., Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University. Ph.: (495) 939-25-42. E-mail: n.vaigel@gmail.com.