

УДК 631.4

## ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННЫХ ГЕЛЕЙ НА ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЧВАХ

© 2023 г. Г. Н. Федотов<sup>1,\*</sup>, член-корреспондент РАН С. А. Шоба<sup>1</sup>, Д. А. Ушкова<sup>1</sup>,  
Д. И. Потапов<sup>1</sup>, И. В. Горепекин<sup>1</sup>

Поступило 29.03.2023 г.

После доработки 20.05.2023 г.

Принято к публикации 29.05.2023 г.

На основе проведенного анализа предположительных механизмов гистерезиса основной гидрофизической характеристики (ОГХ) кривых иссушения и увлажнения почв, а также представлений о наноструктурной организации почв сделан вывод о том, что гистерезис может быть обусловлен либо стабильной (неколлоидные частицы), либо лабильной (гели) частями твердой фазы почв. В связи с тем, до настоящего времени основное внимание уделяли изучению влияния на гистерезис ОГХ стабильной твердой фазы почв, было предложено исследовать влияние на гистерезис почвенных гелей. Для этого было изучено влияние на начальную вязкость почвенных паст влажности почвенных образцов, приготовленных иссушением и увлажнением. Установлено, что для образцов всех изученных типов почв наблюдается хорошо выраженный гистерезис. Для объяснения гистерезиса предложено два механизма, основанных на изменении почвенных гелей в процессах увлажнения–высушивания. Один из них базируется на замедленности набухания и усадки почвенных гелей при поглощении и выделении ими воды. Второй – на большей гидрофобности поверхности гелей, содержащих меньше воды, и проскальзывании воды на гидрофобных участках поверхности с уменьшением вязкости паст. Таким образом, проведенные исследования показали, что гистерезисные явления в почвах обусловлены почвенными гелями и их изменениями при иссушении и увлажнении почв.

*Ключевые слова:* гистерезис почвенных свойств, наноструктурная организация почв, почвенные гели, гидрофобизация почвенных гелей

DOI: 10.31857/S2686739723600637, EDN: LZRNEP

### ВВЕДЕНИЕ

Для почв хорошо известны гистерезисные явления. Так, взаимоотношение между содержанием воды и матричным потенциалом различается в зависимости от того, иссушается почва или увлажняется. Эта зависимость известна как гистерезис основной гидрофизической характеристики (ОГХ). Имеются данные о существовании гистерезиса для набухания и усадки почв [1], а также для температуропроводности [2].

В последние несколько десятилетий считалось, что эффект гистерезиса кривой насыщения капиллярного давления обусловлен такими факторами, как контактный угол смачивания и эффект бутылочного горлышка (“жаменовских цепочек”) [3], а кривая водоудерживания почвами воды отражает распределения пор по размерам [4].

Аргументом в пользу гистерезиса, обусловленного контактным углом смачивания, может быть явление выпуклости передней части и сжатия задней части капли воды, когда она скользит по склону, что обусловлено поверхностным натяжением жидкости [3]. Эффект бутылочного горлышка состоит в том, что в естественной поровой среде, особенно структурированных почв, определенный процент порового пространства не дренируется, поскольку поры либо не связаны, либо связаны с атмосферой через меньшие поры. С порами неправильной формы дренаж определяется по наименьшему отверстию или горловине, в то время как поступление воды зависит от размеров основного порового тела. Маленькие поры заполняются в первую очередь и пустеют в последнюю, в то время как большие опустошаются первыми, а заполняются последними. Однако большие поры, которые соединены с атмосферой через более мелкие поры, не опустеют, пока последние не осушатся [5].

Изучение влияния на гистерезис органического вещества (ОВ) почв показывает положительную линейную зависимость между содержанием

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

ОВ и гистерезисом воды [5]. Авторы считают, что ОВ почв, по-видимому, увеличивает разницу в распределении пор по размерам микроагрегатов и, следовательно, изменяет гистерезисное удержание воды. Увеличение происходит из-за того, что заполненные ОВ поры могут уменьшить связность и увеличить извилистость путей потока воды между порами. Вода, удерживаемая в небольших порах, заполненных ОВ почв, вероятно, менее подвижна и, следовательно, препятствует дренажу более крупных пор, которые соединены через небольшие заполненные ОВ горловины пор. При этом современные представления о структурной организации гумусовых веществ почв [6–8] в этих рассмотренных не используются.

Существуют и другие объяснения гистерезиса, такие как капиллярная конденсация, расширение и сжатие материалов [3], но твердо установленные представления о механизме данного эффекта в настоящее время отсутствуют. При этом надо учитывать, что само существование явления свидетельствует о зависимости системы не только от своего текущего состояния, но и от ее предыстории [3].

По нашему мнению, трудности при решении задачи о механизме гистерезиса связаны с использованием для объяснения явления устаревшей трехфазной модели почв [1].

Исходя из литературных данных по наноструктурной организации почв [9–11], можно принять, что гистерезис ОГХ должен определяться стабильной (неколлоидные частицы) или лабильной (гели) частями твердой фазы почв. Выбрать часть почвенной системы, которая определяет гистерезис ОГХ, достаточно сложно, но нахождение такого компонента будет важным шагом вперед в понимании механизма гистерезиса.

Для ответа на вопрос о механизме гистерезисных явлений в почве было необходимо провести изучение тех свойств почв, которые определяет не структура стабильной твердой фазы почв, а почвенные гели.

На наш взгляд, к таким свойствам можно отнести начальную вязкость почвенных паст [12]. Обусловлено это тем, что изменение вязкости паст определяется, в первую очередь, толщиной пленок свободной воды [13], окружающей частицы в пасте и возможностью встраивания этой воды в гели, окружающие почвенные частицы<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Здесь говорится о переходе воды в связанное с почвенными частицами состояние. Необходимо отметить, что речь идет не об энергетической связи воды с почвенными частицами, а о возможности движения воды относительно почвенных частиц или вместе с этими частицами. Подобное закрепление в гелях возможно и для энергетически свободной воды, так как определяется временем релаксации – большим временем выхода воды из гелей по сравнению с временем движения почвенной частицы в пасте вместе с гелями.

То есть это свойство связано с изменением гелей в почвах.

Целью работы являлось выяснение природы гистерезиса почвенных свойств путем установления его связи со стабильной или лабильной (гелями) частями твердой фазы почв на основе изучения вязкости почвенных паст.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовали образцы дерново-подзолистой почвы (Московская область), серой лесной почвы (Тульская область), чернозема выщелоченного (Орловская область).

При приготовлении образцов для кривой увлажнения в качестве начальной точки использовали почву с влажностью 0.5 от наименьшей влагоемкости. Необходимой влажности достигали, добавляя навеску воды к этой почве. Образцы выдерживали в герметично закрытых контейнерах в течение недели, после чего определяли их вязкость.

В качестве отправной точки для кривой иссушения использовали почву с влажностью, равной наименьшей влагоемкости. Для обеспечения медленного удаления воды из образца, его выдерживали в емкости, на которой сверху была закреплена хлопчатобумажная ткань. По мере высушивания образца определяли его вязкость.

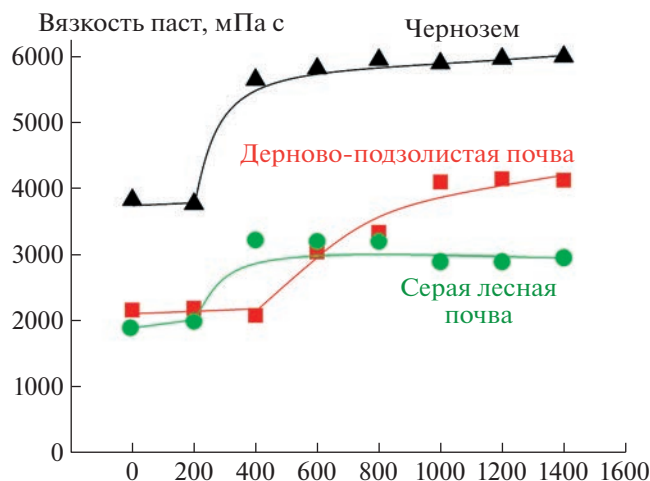
Почвенную пасту готовили, добавляя к навеске необходимое количество<sup>2</sup> воды и перемешивая в течение 3–5 мин. Для проведения механической обработки в течение 1 минуты использовали мешалку MLW MR 25 (Германия), меняя число оборотов.

Для определения вязкости паст использовали вибрационный вискозиметр SV-10 фирмы “AND” (Япония). Принцип метода основан на том, что при приготовлении суспензии (пасты) из почв их вязкость определялась свойствами почв, из которых их готовили. Время измерения – 15 сек.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы необходимо было выбрать условия, при которых следовало проводить сравнение вязкостей почвенных паст, приготовленных из почвенных образцов с разной влажностью и предысторией. Основными параметрами, от которых зависела вязкость почвенных паст, были, во-первых, высушивание почвенных образцов перед приготовлением паст и, во-вторых, величина механических воздействий при приготовлении (перемешивании) паст.

<sup>2</sup> Количество добавляемой к образцу почвы воды обусловлено рабочим диапазоном вискозиметра.

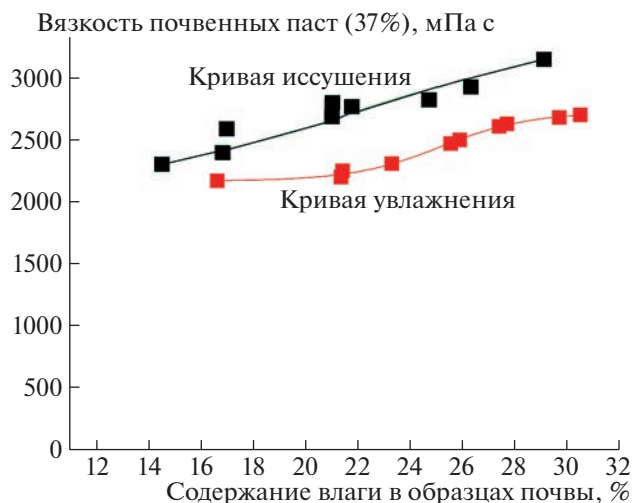


**Рис. 1.** Влияние механических воздействий на пасты, приготовленные из почв различных типов, на вязкость этих паст.

Было установлено, что высушивание образцов до воздушно-сухого (ВС) состояния коренным образом изменяет их свойства, делая их практически неспособными к возврату по свойствам к состоянию исходной влажности и использовать для приготовления почвенных паст воздушно-сухие образцы почв не имело смысла. Необходимо было изучать гистерезис в интервале влажностей почвенных образцов, когда с ними не происходит кардинальных изменений.

При изучении влияния механических воздействий на вязкость почвенных паст для всех изученных почв были получены характерные S-образные кривые (рис. 1). При малых механических воздействиях на пасты величина вязкости имела примерно постоянные небольшие значения. При росте числа оборотов вязкость начинала расти, постепенно выходя на «плато». Механизм для наблюдаемой зависимости был вполне очевиден. При малых величинах механических воздействий количество частиц в пасте находилось на постоянном уровне. Затем при росте механических воздействий частицы в пасте начинали распадаться, их число росло, что приводило к росту вязкости пасты. После того как частицы разделялись, рост механического воздействия переставал оказывать влияние на количество частиц в пасте, и их вязкость выходила на постоянный уровень.

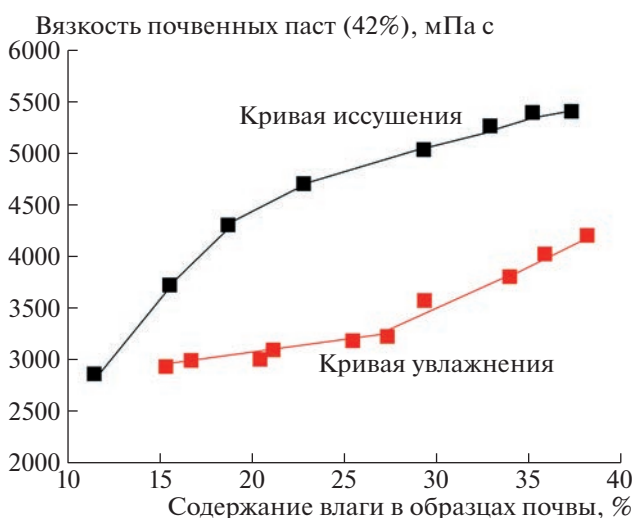
Из полученных данных следовало, что изучение почвенных паст, приготовленных из почвенных образцов с разной влажностью и предысторией, следовало проводить на почвенных образцах, которые не подвергались высушиванию до ВС-состояния, при минимальных механических воздействиях на них, чтобы оставаться на начальном постоянном участке кривой «вязкость паст–мехвоздействие».



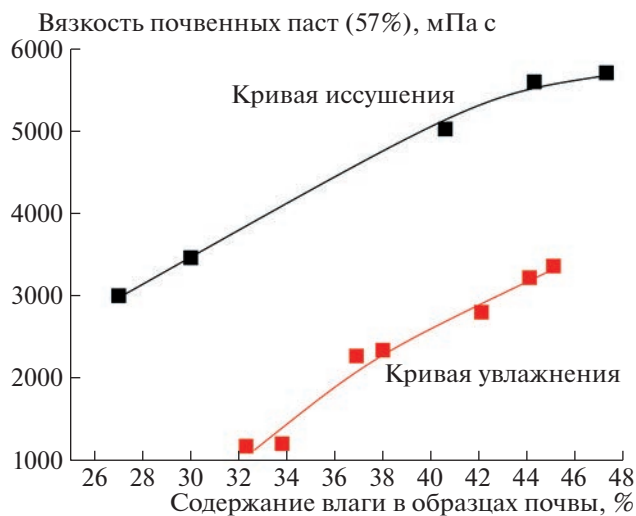
**Рис. 2.** Влияние влажности образцов дерново-подзолистой почвы, получаемых увлажнением и иссушением, на вязкость приготовленных из них почвенных паст с содержанием воды 37%.

После изучения образцов дерново-подзолистой, серой лесной почв и чернозема стало отчетливо видно, что для всех изученных типов почв наблюдается хорошо выраженный гистерезис (рис. 2–4).

При этом наблюдаемый гистерезис невозможно было объяснить «жаменовскими цепочками», так как в пастах «жаменовские цепочки» не могут существовать и определять свойства паст. Капиллярная конденсация, также как расширение и сжатие материалов не в состоянии объяснить наличие гистерезиса для вязкости почвенных паст.



**Рис. 3.** Влияние влажности образцов серой лесной почвы, получаемых увлажнением и иссушением, на вязкость приготовленных из них почвенных паст с содержанием воды 42%.



**Рис. 4.** Влияние влажности образцов чернозема, получаемых увлажнением и иссушением, на вязкость приготовленных из них почвенных паст с содержанием воды 57%.

Можно предложить два механизма, которые оба связаны с влиянием на вязкость паст изменения почвенных гелей.

Первый механизм основан на изменении смачивания поверхностей почвенных частиц, покрытых почвенными гелями (изменении гидрофобно-гидрофильных свойств почвенных гелей). Поверхность иссушаемых гелей должна быть более гидрофильна<sup>3</sup> и, следовательно, должна сильнее взаимодействовать с водой (обеспечивать большую вязкость). Поверхность увлажняемых гелей должна быть более гидрофобна [14] и из-за эффекта проскальзывания [15] ее взаимодействие с водой должно быть меньше, а вязкость паст, как следствие, ниже.

Второй механизм может быть основан на том, что иссушаемые почвенные гели в сравнении с увлажняемыми гелями при одинаковой влажности должны включать в свой состав большее количество воды, так как процессы их расширения с поглощением воды или сжатия с ее выделением требуют времени [9]. Как следствие, при одинаковом содержании влаги в почвенных пастах толщина пленок свободной воды между частицами должна быть в иссушаемых гелях (образцах почв) ниже, а вязкость паст выше.

Анализ показывает, что оба эффекта, обеспечивающие механизм процесса гистерезиса, действуют в одном направлении и соответствуют полученным экспериментальным данным.

<sup>3</sup> Так как иссушение проводили от значений НВ, поверхность почвенных частиц была более гидрофильна, чем поверхность увлажняемых частиц, исходная влажность которых составляла 0.5 от НВ.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что гистерезисные явления в почвах обусловлены почвенными гелями и их изменениями при иссушении и увлажнении почв. При этом логично предположить, что гистерезис всех почвенных свойствах определяется единым механизмом.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МГУ №122011800459-3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
2. *Rubio C.M., Josa R., Ferrer F.* Influence of the hysteretic behaviour on silt loam soil thermal properties // *Open Journal of Soil Science*. 2011. V. 1. № 3. P. 77–85.
3. *Chena H., Chena K., Yanga M.* A new hysteresis model of the water retention curve based on pore expansion and contraction // *Computers and Geotechnics*. 2020. V. 121. P. 103482.
4. *Ghanbarian-Alavijeh B., Millán H., Huang G.* A review of fractal, prefractal and pore-solid-fractal models for parameterizing the soil water retention curve // *Canadian Journal of Soil Science*. 2011. V. 91. № 1. P. 1–14.
5. *Zhuang J., McCarthy J.F., Perfect E., Mayer L.M., Jastrow J.D.* Soil Water Hysteresis in Water-Stable Microaggregates as Affected by Organic Matter // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2008. V. 72. № 1. P. 212–220.
6. *Piccolo A.* The Supramolecular Structure of Humic Substances // *Soil Science*. 2001. V. 166. № 11. P. 810–832.
7. *Schmidt M., Torn M., Abiven S. et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. V. 478. P. 49–56.
8. *Schaumann G.E.* Soil organic matter beyond molecular structure Part I: Macromolecular and supramolecular characteristics // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2006. V. 169. № 2. P. 145–156.
9. *Тюлин А.Ф.* Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.
10. *Федотов Г.Н., Добровольский Г.В.* Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей // *Почвоведение*. 2012. № 8. С. 908–920.
11. *Маттсон С.* Почвенные коллоиды. М.: Сельхозгиз, 1938. 432 с.
12. *Шоба С.А., Потапов Д.И., Горепекин И.В., Ушкова Д.А., Грачева Т.А., Федотов Г.Н.* Состояние почвенных гелей при разной пробоподготовке к вискозиметрии образцов дерново-подзолистой почвы // *Доклады Российской академии наук. Науки о жизни*. 2022. Т. 504. С. 240–244.

13. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Химия. 1982, 463 с. зические свойства и аллелотоксичность // Почвоведение. 2022. № 3. С. 315–325.
14. *Потапов Д.И., Шваров А.П., Горепекин И.В., Салимгареева О.А., Федотов Г.Н.* Влияние пробоподготовки почвенных образцов на их теплогидрофи- 15. *Виноградова О.И.* Особенности гидродинамического и равновесного взаимодействия гидрофобных поверхностей / Дисс. докт. физ.-мат. наук. М.: 2000. 175 с.

## EFFECT OF SOIL GELS ON HYSTERESIS PHENOMENA IN SOILS

**G. N. Fedotov<sup>a,#</sup>, Corresponding Member of the RAS S. A. Shoba<sup>a</sup>, D. A. Ushkova<sup>a</sup>,  
D. I. Potapov<sup>a</sup>, I. V. Gorepekin<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

Based on the analysis of the exist mechanisms of the hysteresis of soil water retention curve (WRC), as well as ideas about the nanostructural organization of soils, it is concluded that hysteresis can be caused either by stable (non-colloidal particles) or labile (gels) parts of the solid phase of soils. Due to the fact that until now the main attention has been paid to the study of the effect of stable solid phase of soils on the hysteresis of WRC, it was proposed to investigate the effect of soil gels on hysteresis. For this purpose, the effect of moisture content of soil samples prepared by drying and moistening on the initial viscosity of soil pastes was studied. It has been established that well-pronounced hysteresis is observed for samples of all studied soil types. To explain the hysteresis, two mechanisms based on changes in soil gels in the humidification-drying processes are proposed. One of them is based on the slowness of swelling and shrinkage of soil gels when they absorb and release water. The second is on the greater hydrophobicity of the surface of gels containing less water, and water slipping on hydrophobic areas of the surface with a decrease in the viscosity of pastes. Thus, the conducted studies have shown that hysteresis phenomena in soils are caused by soil gels and their changes during drying and moistening of soils.

*Keywords:* hysteresis of soil properties, nanostructural organization of soils, soil gels, hydrophobization of soil gels