

УДК 631.4

СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННЫХ ГЕЛЕЙ ПРИ РАЗНОЙ ПРОБОПОДГОТОВКЕ К ВИСКОЗИМЕТРИИ ОБРАЗЦОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

© 2022 г. Член-корреспондент РАН С. А. Шоба¹, Д. И. Потапов¹, И. В. Горепекин¹, Д. А. Ушкова¹, Т. А. Грачева^{1,*}, Г. Н. Федотов¹

Поступило 20.11.2021 г.
После доработки 02.02.2022 г.
Принято к публикации 02.02.2022 г.

С середины 20-го века хорошо известно наличие в почвах пленок органоминеральных гелей, покрывающих и связывающих между собой почвенные частицы. Было показано, что контакт почвы с водой приводит к поглощению воды гелями и их набуханию. Изменение свойств гелей в почвах должно проявляться в изменении вязкости почвенных паст. В работе предложено использовать для определения вязкости почвенных паст вибрационный вискозиметр. Для интерпретации полученных данных использован физический смысл, заложенный в формуле Эйнштейна. Благодаря этому появилась возможность оценивать степень набухания гелей по количеству воды, способной двигаться независимо от почвенных частиц, т.е. не включенной в состав почвенных гелей (свободной воды). Было изучено влияние на степень набухания почвенных гелей: 1) влажности почвенных образцов, из которых готовили почвенные пасты; 2) времени, прошедшего после добавления воды при приготовлении почвенных образцов, из которых в дальнейшем готовили почвенные пасты; 3) пробоподготовки почвенных образцов (исходных, автоклавированных, высушенных до воздушно-сухого и абсолютно-сухого состояний и вновь увлажненных), из которых затем готовили почвенные пасты. В ходе экспериментов установлено, что 1) с увеличением влажности почвенных образцов степень набухания почвенных гелей увеличивается; 2) при возрастании времени взаимодействия почвенных образцов с водой увеличивается степень набухания почвенных гелей; 3) в пастах, приготовленных из почвенных образцов, имеющих одинаковую влажность, но разную пробоподготовку, отличается степень набухания почвенных гелей.

Ключевые слова: высушивание почв, автоклавирование почв, вискозиметрия почвенных паст, свободная вода в почвах, гелевые структуры почв

DOI: 10.31857/S2686738922030076

В настоящее время для объяснения происходящих в почвах процессов широко используют физическую модель структурной организации почв [1]. Из нее следует, что почва состоит из твердой, жидкой и газообразной фаз.

Позднее появилась коллоидно-химическая модель [2], которая придает большое значение наличию на границе твердой и жидкой фаз органоминерального гелевого слоя, обеспечивающего существование не только ионообменных, но и других свойств почв. В частности, было показано, что при взаимодействии с почвами вода со временем теряет подвижность, входя в почвенные гели [3].

При этом экспериментальные методы, позволяющие оценить количество воды, входящей в почвенные гели, отсутствуют. В результате пред-

ставление о почвенных гелях и их набухании носит умозрительный характер, что мешает рассмотрению почв с позиции наличия и функционирования в них гелей.

В теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) существует классический подход: “Если вы не можете измерить изменения в системе, то присоедините к системе внешнюю среду, отклик которой коррелирует с этими изменениями” [4]. В качестве внешней среды в данном случае удобно использовать воду, проводя изучение вязкости почвенных паст.

Для этой цели в почвоведении часто используют ротационную вискозиметрию [5]. Как правило, ее применяют для изучения изменений в пастах, возникающих под влиянием механического воздействия, т.е. ротационный вискозиметр измеряет состояние почвенных гелей. При этом для изучения состояния гелей в почвах необходим метод, позволяющий оценивать состояние гелей в почвенных пастах без их значимого изменения в процессе измерения.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: tanyadunaeva12@mail.ru

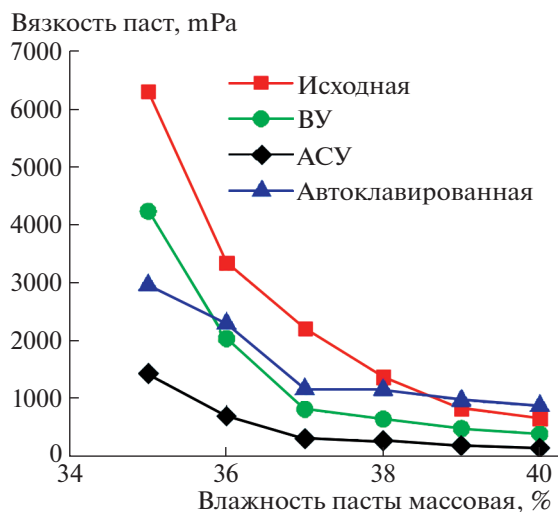


Рис. 1. Зависимость вязкости паст от содержания в них воды, приготовленных из почвенных образцов с разной пробоподготовкой, имеющих влажность 19%.

Таким методом является вибрационная вискозиметрия. Метод позволяет определять вязкость паст за короткое время, оказывая минимальное механическое воздействие на пасту и мало изменяя почвенные гели.

В связи с тем, что вода в пастах либо входит в состав почвенных гелей, либо является свободной¹ для получения информации о количестве свободной воды в пастах, которое должно характеризовать состояние гелей в почвах, удобно использовать уравнение Эйнштейна² [6].

Целью работы была оценка состояния почвенных гелей при их взаимодействии с водой для образцов с разной пробоподготовкой (предыстории).

Из цели вытекают следующие задачи по изучению влияния различных параметров пробоподготовки на состояние почвенных гелей:

- 1) влажности почвенных образцов, из которых готовили почвенные пасты;
- 2) времени, прошедшего после добавления воды при приготовлении почвенных образцов, из которых в дальнейшем готовили почвенные пасты;
- 3) пробоподготовки почвенных образцов (исходных, автоклавированных, высушенных до воздушно-сухого и абсолютно-сухого состояний и вновь увлажненных), из которых затем готовили почвенные пасты.

¹ Свободная вода — вода, способная двигаться независимо от почвенных частиц, т.е. не включенная в состав почвенных гелей.

² В количественной форме оно применимо только для неконцентрированных суспензий, но физический смысл его должен сохраняться и для концентрированных суспензий.

В работе использовали образцы исходной агродерново-глубокоподзолистой легкосуглинистой почвы³ (Albic Retisols (Loamic, Agric, Cutanic, Ochric)), отобранные из пахотного горизонта в окрестностях поймы р. Яхромы, и образцы этой почвы, которые были предварительно высушены до воздушно-сухого и абсолютно-сухого состояний (ВС и АС), опять увлажнены и выдержаны в герметично закрытой емкости при температуре 26–28°C не менее 2 нед (ВУ и АСУ). Образцы почвы, прошедших термообработку, готовили, прогревая в автоклаве исходную почву при избыточном давлении 4.5 атм (148°C). Полученные образцы с разной пробоподготовкой увлажняли до требуемой влажности и выдерживали необходимое время. Пасты готовили, добавляя воду к почвам и перемешивая пасты в течение нескольких минут вручную.

Для определения вязкости паст использовали вибрационный вискозиметр SV-10 фирмы AND (Япония). Принцип работы прибора основан на поддержании амплитуды вынужденных колебаний чувствительного элемента (камертона), помещенного в вязкую среду, за счет изменения силы тока. Время измерения — 15 с. Амплитуда колебаний камертона 2 мм.

Было изучено влияние пробоподготовки образцов почв на вязкость полученных из них паст. Из полученных данных (рис. 1) хорошо видно, что:

- среди паст, приготовленных из образцов Исходной, Высушенной увлажненной и Абсолютно сухой почв, во всем интервале содержания в них воды они располагаются по вязкости последовательно — вязкость почв из Исходной почвы всегда выше, а из Абсолютно сухой почвы всегда ниже;
- кривая изменения вязкости пасты, приготовленной из Автоклавированной почвы, имеет более сложный характер и пересекает кривые для образцов паст из Исходной и Высушенной увлажненной почв.

При изучении влияния влажности образцов почв до приготовления паст на вязкость паст хорошо видно (рис. 2), что увеличение влажности во всех случаях (за исключением Абсолютно сухой почвы) приводит к росту их вязкостей. Для паст, приготовленных из Абсолютно сухой почвы разных влажностей, вязкость значительно не изменяется.

Исследование влияния времени, прошедшего после доведения почвенных образцов до необходимой влажности, показало, что вязкость приго-

³ Гранулометрический состав почв (по Н.А. Качинскому). Фракции: >1 мм = 1.33%; 1–0.25 = 2.87%; 0.25–0.05 = 25.82%; 0.05–0.01 = 42.78%; 0.01–0.005 = 6.73%; 0.005–0.001 = 8.22%; <0.001 = 12.25%. Общее содержание углерода, определенное на CNS анализаторе, составляет 1.65% (гумуса 2.8%).

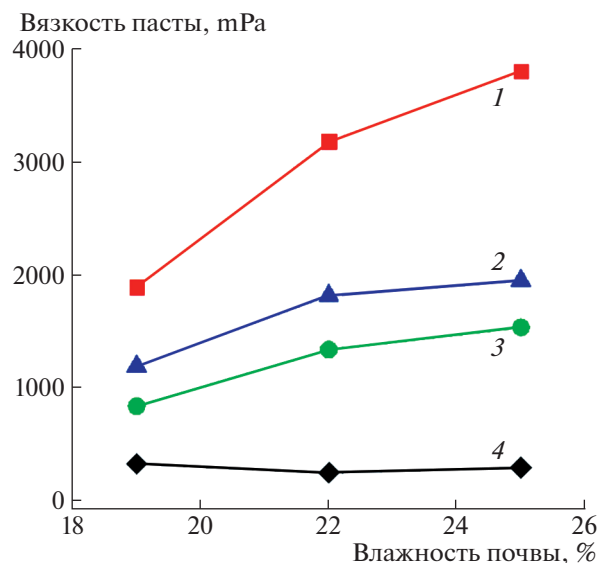


Рис. 2. Зависимость вязкости пасты от исходной влажности образцов дерново-подзолистой почвы, имеющих разную пробоподготовку. Содержание воды в пастах пасты 37%. Почвы: 1 – исходная, 2 – автоклавированная, 3 – ВУ, 4 – АСУ.

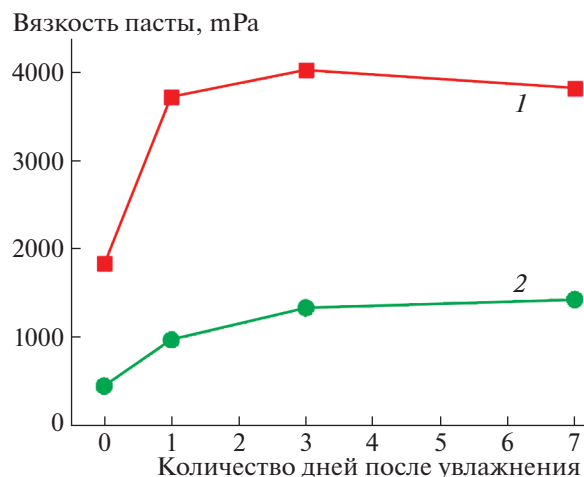


Рис. 3. Динамика изменения вязкости пасты в зависимости от времени, прошедшего после увлажнения образцов Исходной (1) и ВУ (2) дерново-подзолистой почвы. Влажность почв до увлажнения 19%. Влажность почв после увлажнения 25%. Содержание воды в пастах 37%.

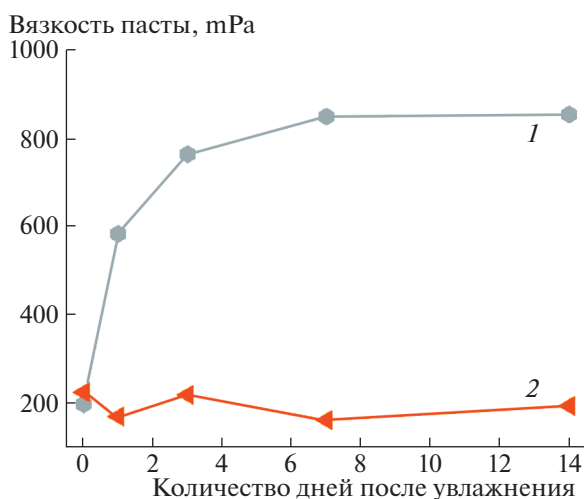


Рис. 4. Динамика изменения вязкости пасты в зависимости от времени, прошедшего после увлажнения ВС (1) и АС (2) образцов дерново-подзолистой почвы. Влажность почвы 19%. Содержание воды в пастах 37%.

товленных из них паст от времени их взаимодействия с водой возрастает, выходя на постоянные значения через 3–7 сут (рис. 3–4). Причем почвенные образцы, уже содержащие относительно большие количества воды (Исходная и Высушенная увлажненная), приходят к равновесию быстрее (3 сут) по сравнению с Воздушно-сухой почвой (7 сут).

Для трактовки полученных результатов имеет смысл привлечь уравнение Эйнштейна для вязкости суспензий [6]:

$$\eta = \eta_0 (1 + 2.5\phi), \text{ где}$$

η – вязкость суспензии;

η_0 – вязкость растворителя;

ϕ – объемная доля твердой фазы;

2.5 – коэффициент для сферических твердых частиц.

В количественной форме оно применимо только для неконцентрированных суспензий, но физический смысл его сохраняется и для концентрированных суспензий.

Из физического смысла этой формулы следует, что при одном и том же количестве воды повышение вязкости суспензии происходит за счет увеличения в ней объемной доли твердой фазы.

Массовая доля твердой фазы для паст с одинаковым содержанием воды, но приготовленных из почвенных образцов с разной пробоподготовкой (рис. 1), не отличается, но различия в вязкости суспензий свидетельствуют, что объемные доли твердой фазы в них разные.

Данное противоречие легко объясняется с позиций коллоидно-химической модели почв. Происходят два дополняющих друг друга процесса:

1) набухание гелей, за счет включения воды в их состав, приводящее к увеличению объемной доли твердой фазы почвы и, как следствие, повышению вязкости паст;

2) уменьшение количества свободной воды за счет ее поглощения почвенными гелями, также приводящее к повышению вязкости паст.

Таким образом, при одном и том же содержании воды в почвенной пасте ее вязкость будет зависеть от степени набухания гелей и соответственно количества поглощенной ими свободной воды. При этом объем твердой фазы почвы в пастах остается тем же, что и до их приготовления, поэтому показатель вязкости будет зависеть от степени расширения гелей, которую почва имела до измерения.

При трактовке полученных данных с этих позиций следует, что, во-первых, в почвенных образцах с разной пробоподготовкой при одинаковой влажности почвенные гели имеют разную степень набухания (рис. 1). Сильнее всего набухают почвенные гели Исходного образца, а меньше всего набухают почвенные гели образцов почвы, прошедшие термообработку при 105°C. Во-вторых, при увеличении влажности почвенных образцов степень набухания почвенных гелей возрастает (рис. 2). В-третьих, при возрастании времени взаимодействия почвенных образцов с водой увеличивается степень набухания почвенных гелей (рис. 3–4).

Используемая нами методика позволяет на основе измерения вязкости паст на вибрационном вискозиметре изучать характер набухания почвенных гелей. При этом применяемую трактовку процесса набухания почвенных частиц с позиций физической модели почв, основанную на набухании почвенных минералов и осмотических процессах [1], нельзя назвать безупречной. Для объяснения полученных данных с этих позиций необходимо предположить, что при высушивании и автоклавировании почв в почвенных частицах возникают кристаллизационные контакты, которые снижают их способность к набуханию.

Для высушиваемых почвенных образцов подобное объяснение можно принять, но предста-

вить возникновение кристаллизационных контактов во влажных образцах почв, которые подвергали автоклавированию, достаточно сложно.

Использование коллоидно-химической модели почв снимает противоречия. За счет перехода некоторых частиц в гелях к фиксации в ближнем минимуме агрегации возникают дополнительные гидрофобные связи [7], в результате чего должна снижаться способность гелей к набуханию. При этом для снижения способности гелей и соответственно почв к набуханию не требуется возникновения кристаллизационных контактов.

С этих же позиций перестройкой гелевой матрицы непротиворечиво объясняется замедленность процессов набухания до 3–7 дней. При увеличении содержания воды в почвах гели постепенно увеличивают свой объем за счет поглощения воды. Однако следует учитывать, что процесс вхождения воды в гели требует времени, поэтому даже после добавления воды в почву необходимо время для ее вхождения в гели (набухания гелей). Таким образом, пока почва после добавления воды не пришла к равновесию (гели не расширились и не вобрали в себя воду), свойства паст, приготовленных из почв равновесных и находящихся на пути к равновесию, будут отличаться.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод, основанный на использовании вибрационной вискозиметрии, позволяющий оценивать в почвенном образце набухание почвенных гелей.
2. На основе применения нового метода выдвинуто предположение, что при высушивании и термообработках почвенных образцов в их гелевой матрице возникают дополнительные гидрофобные связи, которые препятствуют набуханию гелей и самих почвенных частиц.
3. Полученные данные позволяют предположить, что увеличение количества связей в гелях замедляет поглощение ими воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шеин Е.В.* Курс физики почв.: Учебник. — М.: Изд МГУ, 2005. — 432 с.
2. *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.
3. *Федотов Г.Н.* Гелевые структуры в почвах. Дисс. докт. биол. наук. М. 2006. 355 с.
4. *Альтшуллер Г.С.* Алгоритм изобретения. М.: Московский рабочий, 1973. 400 с.
5. *Николаева И.В.* Реологические свойства дерново-подзолистых почв и черноземов при различном

- сельскохозяйственном использовании. Дисс. канд. биол. наук. М. 2008. 153 с.
6. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Химия. 1982. 463 с.
7. *Потапов Д.И., Шваров А.П., Горепекин И.В., Салимгареева О.А., Федотов Г.Н.* Влияние пробоподготовки почвенных образцов на их теплогидрофизические свойства и аллелотоксичность // Почвоведение. 2022. № 3. С. 315–325.

STATE OF SOIL GELS UNDER DIFFERENT PREPARATION OF SAMPLES OF SODDY-PODZOLIC SOIL FOR VISCOMETRY

Corresponding Member of the RAS **S. A. Shoba^a, D. I. Potapov^a, I. V. Gorepekin^a, D. A. Ushkova^a, T. A. Gracheva^{a,#}, and G. N. Fedotov^a**

^a *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#]*e-mail: tanyadunaeva12@mail.ru*

Since the middle of the 20th century, the presence of films of organomineral gels covering and binding soil particles in soils is well known. It has been shown that the contact of soil with water leads to the absorption of water by gels and their swelling. The change in the properties of gels in soils should manifest itself in a change in the viscosity of soil pastes. It is proposed to use a vibrating viscometer to determine the viscosity of soil pastes. To interpret the data obtained, the physical meaning laid down in Einstein's formula is used. Thanks to this, it became possible to assess the degree of swelling of gels by the amount of water capable of moving independently of soil particles, i.e. not included in the composition of soil gels (free water). It was studied the effect on the degree of swelling of soil gels: 1) the moisture content of soil samples from which soil pastes were prepared; 2) the time elapsed after the addition of water during the preparation of soil samples from which soil pastes were subsequently prepared; 3) sample preparation of soil samples (initial, autoclaved, dried to air-dry and absolutely-dry states and re-moistened), from which soil pastes were then prepared. During the experiments, it was found that 1) with an increase in the moisture content of soil samples, the degree of swelling of soil gels increases; 2) with an increase in the time of interaction of soil samples with water, the degree of swelling of soil gels increases; 3) in pastes prepared from soil samples having the same humidity, but different sample preparation, the degree of swelling of soil gels differs.

Keywords: drying of soils, autoclaving of soils, viscometry of soil pastes, free water in soils, gel structures of soils