

УДК 631.4

ТРЕХФАЗНАЯ И ГЕЛЕВАЯ МОДЕЛИ ПОЧВ В АНАЛИЗЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2024 г. Г. Н. Федотов^{1,*}, член-корреспондент РАН С. А. Шоба¹, Д. А. Ушкова¹, И. В. Горепекин¹, А. И. Сухарев¹, Д. И. Потапов¹

Поступило 27.10.2023 г.

После доработки 15.11.2023 г.

Принято к публикации 23.11.2023 г.

Рассмотрение результатов экспериментов в физике почв принято проводить с позиции трехфазной модели почв. Наряду с трехфазной существует гелевая модель почв. Основу моделей составляют разные принципы: в трехфазной модели – постоянство твердой фазы и подвижность жидкой, в гелевой модели – способность почвенных гелей набухать, твердеть и снижать подвижность воды. Цель работы – оценка применимости использования трехфазной и гелевой моделей почв для анализа результатов изучения некоторых физических свойств почв. Исследования проведены на почвах зонального ряда: дерново-подзолистой, серой лесной, черноземе, каштановой. В работе использовали методы: вибрационной вискозиметрии, лазерной дифрактометрии, электросопротивления почв. При изучении физических свойств почв были получены неожиданные результаты. Во-первых, кривая влияния влажности образцов на вязкость приготовленных из них паст достигла максимума в области влажности разрыва капилляров (ВРК). Во-вторых, при усилении механического воздействия на почвенные пасты размер частиц в них не уменьшился, а увеличился. В-третьих, зависимость электросопротивления почв от их влажности сохраняет равномерный ход в области ВРК, хотя при этой влажности исчезает непрерывный каркас жидкой фазы в почвах, обеспечивающий влагопроводность и электропроводность. В-четвертых, влажные почвы высыхают в эксикаторе над водой. Объяснить эти результаты с позиций общепринятой в почвоведении трехфазной модели почв не представляется возможным. Поэтому для анализа результатов использовали гелевую модель почв, которая позволила объяснить все полученные результаты.

Ключевые слова: влажность разрыва капилляров, высушивание почв, почвенные пасты, лазерная дифрактометрия, электросопротивление почв, надмолекулярные образования гуминовых веществ

DOI: 10.31857/S2686739724030175

Физические свойства почв в качестве характеристики среды обитания растений очень важны, так как они обеспечивают оптимальные для роста и развития растений водный, воздушный и тепловой режимы.

Большинство представлений в физике почв базируется на трехфазной модели, основанной на существовании в почвах трех агрегатных состояний [1]: твердого – минеральные и органические частицы, жидкого – почвенный раствор и газовой фазы почв.

В последние десятилетия для объяснения экспериментальных результатов стали использовать гелевую модель почв. Она основана на том, что почвенные отдельные части состоят из более мелких

частиц, покрытых и связанных между собой почвенными гелями [2]. Основой этих гелей являются гуминовые вещества (ГВ).

Современные методы исследования позволили уточнить представления о строении ГВ в водных растворах и почвах.

Методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) показано [3], что ГВ в растворах образуют фрактальные кластеры (Ф-кластеры) размером 100–200 нм из частиц-молекул, которые имеют мозаичную гидрофильно-гидрофобную поверхность [4]. Аналогичная информация о строении ГВ в растворах получена и другими методами [5, 6].

Исследование образцов почв методом МУРН показало [7], что коллоидная составляющая почв различных типов организована фрактально. Причем размерный диапазон этой организации

¹Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
*E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

приближается к размерам Ф-кластеров гуминовых кислот (ГК) [7]. Это позволяет сделать вывод, что основой почвенных гелей являются Ф-кластеры из частиц-молекул ГВ.

При объяснении физических свойств с позиции трехфазной и гелевой моделей в почвах должны происходить разные процессы. Отличия объясняются тем, что в основе двух моделей лежат разные принципы: в трехфазной модели — постоянство твердой фазы и подвижность жидкой, в основе гелевой модели — способность почвенных гелей набухать, твердеть и снижать подвижность воды.

Целью работы являлась оценка применимости использования трехфазной и гелевой моделей почв для анализа результатов изучения некоторых физических свойств почв.

В качестве объектов исследования использовали образцы из гумусово-аккумулятивных горизонтов почв зонального ряда:

- дерново-подзолистой (Московская область);
- серой лесной (Тульская область);
- чернозема (Орловская область);
- каштановой (Волгоградская область).

Гранулометрический состав дерново-подзолистой почвы — легкосуглинистый, серой лесной почвы — среднесуглинистый, чернозема — среднесуглинистый, каштановой почвы — легкосуглинистый.

Оценку взаимодействия почвенных образцов с водой проводили путем изучения вязкости почвенных паст.

С позиций физической модели почв этот метод, в первую очередь, дает возможность получать информацию о прочностных характеристиках почвенных частиц [8].

С позиции гелевой модели почв [9], вязкость почвенных паст связана с существованием в почвах Ф-кластеров: чем больше надмолекулярных образований (НМО) образуется из Ф-кластеров и связывает воду, тем выше вязкость образца.

Подготовку образцов для определения вязкости проводили следующим образом. Почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, затем готовили образцы различной влажности, добавляя воду. После этого выдерживали образцы в герметичных емкостях не менее 14 дней.

Через 14 дней из образцов готовили почвенные пасты. К почвам добавляли воду

и перемешивали пасту стеклянной палочкой 3–5 минут. Количество воды определяли исходя из рабочего диапазона чувствительности прибора. Итоговое содержание воды в пастах зависело от типа почвы: дерново-подзолистая почва — 37%, серая лесная почва — 47%, чернозем — 57%, каштановая почва — 47%.

Механическую обработку почвенных паст проводили в течение минуты при помощи мешалки MLW MR25 (Германия), меняя число оборотов.

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 сек. Амплитуда колебаний камертона 2 мм.

Для проверки влияния размера частиц на изменение вязкости почвенных паст использовали лазерный дифрактометр Mastersizer 3000 фирмы “Malvern” (Великобритания). Суспензии готовили, добавляя 10 г пасты к 250 мл воды и перемешивая суспензию 20 минут.

Для проверки движения ионов в почвенном образце при изменении его влажности измеряли удельное электросопротивление почв.

Использовали ячейку размером 110 × 65 × 40 мм. Почвенные образцы доводили до нужной влажности высушиванием. Для этого было необходимо обеспечить скорость удаления воды, при которой влага внутри агрегата распределяется быстрее в сравнении с ее испарением. Чтобы замедлить испарение воды, емкость с почвой (2–3 кг) накрывали хлопчатобумажной тканью и помещали в емкость большего размера с водой. Большую емкость прикрывали пористым материалом, в котором проделывали отверстия диаметром 25 мм. Это позволяло уменьшить потери воды из почвы до значений 0.5% в сутки.

Для определения удельного электросопротивления почв четырехэлектродным методом использовали прибор “LandMapper-02”.

Наименьшую влагоемкость почвенных образцов определяли в соответствии с общепринятой методикой [1].

Измерение влажности почв проводили на влагомере OHAUS MB25.

На первом этапе работы мы изучили влияние влажности почвенных образцов на вязкость приготовленных из них почвенных паст. Было

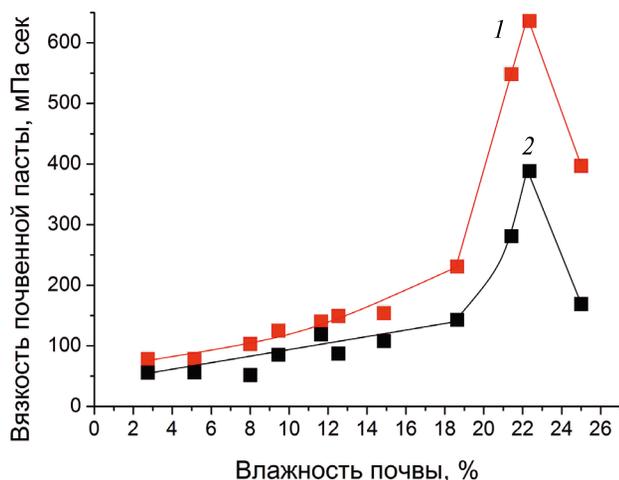


Рис. 1. Влияние влажности образцов дерново-подзолистой почвы на вязкость приготовленных из них паст. Цифрами на рис. обозначены скорости перемешивания паст: 1 – 1200 об/мин; 2 – 200 об/мин.

установлено, что вязкость паст для всех изученных почв меняется сходным образом: сперва наблюдается рост, а затем резкое снижение. Причем при усилении механического воздействия на пасты пики становятся более выраженными. В качестве примера приведены данные для дерново-подзолистой почвы (рис. 1). Учитывая, что наименьшая влагоемкость (НВ) этой почвы составляет 31%, влажность, соответствующая скачку вязкости, близка к гидрологической константе — влажности разрыва капилляров (ВРК) [1]. Пик вязкости паст, приготовленных из образцов с влажностью в области ВРК, обнаружен и на других почвах: серой лесной, черноземе и каштановой.

С позиции физической модели объяснить полученные данные сложно, так как экстремум вязкости не может быть связан с прочностью почвенных частиц: измельчение частиц не меняет их объем, а рост вязкости определяется увеличением доли объема твердой фазы [10].

С позиции гелевой модели почв ситуация выглядит иначе. Проведенные ранее исследования показали [9], что взаимодействие Ф-кластеров определяет вязкость в почвенных пастах.

При высушивании почв до воздушно-сухого состояния — пробоподготовке почв — Ф-кластеры взаимопроникают друг в друга [9]. Это приводит к их укрупнению.

При увлажнении почвы для получения образцов различной влажности (рис. 1) проходит обратный процесс разделения Ф-кластеров,

которые стремятся образовать новые НМО. При сцеплении двух и более Ф-кластеров свободная вода оказывается заключенной в пространстве между ними и ее подвижность снижается [9]. Это приводит к увеличению размера частиц за счет кинетически связанной воды и повышению вязкости почвенных паст. Скорость описываемого процесса растет с увеличением влажности образца, что объясняет наличие пика на графиках (рис. 1).

При переходе через барьерную влажность образцов — ВРК — прочность почвенных агрегатов повышается из-за роста капиллярных сил [11]. Поэтому микроагрегаты в приготавливаемых пастах менее интенсивно распадаются на частицы. Это снижает площадь контакта поверхности гелей, покрывающих почвенные частицы, с водой и уменьшает количество перешедших в воду Ф-кластеров. В результате вязкость почвенных паст снижается¹.

Следует объяснить влияние механического воздействия на величину вязкости (рис. 1). С позиции рассмотренного процесса механическое воздействие при перемешивании паст ускоряет разделение Ф-кластеров. В таком случае с ростом числа оборотов при перемешивании должно происходить увеличение концентрации Ф-кластеров и образование новых НМО из них. Для экспериментальной проверки этого предположения было изучено распределение частиц по размерам в пастах, обработанных мешалкой при различном числе оборотов.

Полученные данные свидетельствуют о том (рис. 2), что при воздействии на пасты с ростом числа оборотов размер частиц увеличивается. Подобные результаты нельзя объяснить с позиции физической модели почв, так как с усилением механического воздействия размер частиц должен уменьшаться.

Суммируем полученные данные по вязкости паст и размеру в них частиц. Во-первых, увеличение скорости перемешивания приводит к укрупнению частиц в пасте. При этом объемная доля твердой фазы остается неизменной. Во-вторых, укрупнение частиц сопровождается уменьшением количества свободной воды и повышением вязкости почвенных паст. Сочетание таких результатов может быть объяснено только включением кинетически свободной воды в состав НМО из Ф-кластеров.

¹ Защемленный воздух в микроагрегатах, по-видимому, не обладает тем разрушающим действием, которое характерно для его действия на макроагрегаты.

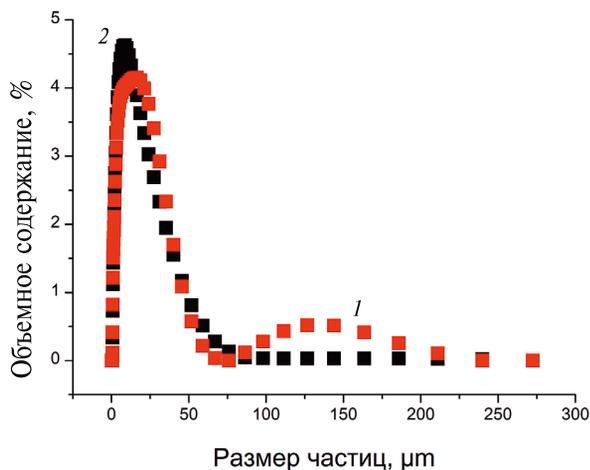


Рис. 2. Распределение размера частиц в почвенных пастах из образцов чернозема при перемешивании: 1 – 1200 об/мин; 2 – 200 об/мин.

Экстремум вязкости почвенных паст в проведенных нами опытах соответствует области ВРК. Поэтому сравним понятие ВРК с позицией двух моделей почв.

С позиций физической модели почва состоит из капилляров, заполненных водой и воздухом. Влажность разрыва капилляров – почвенная гидрологическая константа, которая с позиций физической модели объясняется тем, что непрерывная система жидкой воды в почве разделяется при освобождении части капилляров от воды. Нарушается сплошность водного каркаса в почве, и это приводит к снижению подвижности воды в ней [1, 11, 12].

В литературе показано [12], что вода в капиллярах размером менее 10 мкм теряет подвижность. Физическая модель почв не позволяет объяснить эти данные.

С позиции гелевой модели почв [2] вопрос объяснения потери подвижности воды в капиллярах менее 10 мкм объясняется заполнением этих капилляров гелем. Проверить корректность этого предположения можно при помощи следующего эксперимента.

Естественным следствием потери подвижности воды и разрушения единой гидродинамической системы при влажности в области ВРК должно быть снижение прохождения по этой воде электрического тока.

Данные по изучению электросопротивления чернозема показывают (рис. 3), что при ВРК, которое соответствует 28% (НВ = 40%), электросопротивление не изменяется. Возникает

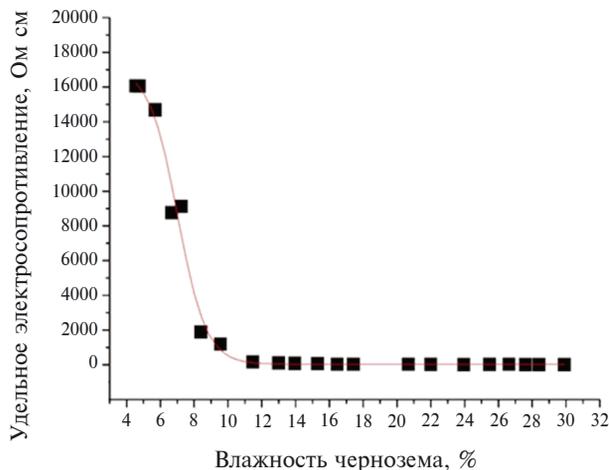


Рис. 3. Влияние влажности чернозема на его электросопротивление.

противоречие, которое нельзя объяснить с позиции трехфазной модели почв: при достижении влажности разрыва капилляров сплошность воды нарушается, а ток продолжает течь.

Это противоречие снимается, если принять, что часть воды в капиллярах теряет подвижность, но не электропроводность. Существование такой воды в почвах в виде малоподвижного геля позволяет разрешить это противоречие.

В физике почв есть и другие вопросы, на которые с позиций физической модели нет однозначных ответов. Например, почему вода из паровой фазы может поглощаться почвой только до максимальной гигроскопичности (МГ) [10]?

С позиции гелевой модели почв поглощение паров воды не может происходить без перестройки структуры гелей и наличия в почве жидкой фазы, которая способна обеспечить достаточную подвижность частиц гелей.

Необходимость жидкой воды для перестройки структуры гелей подтверждается и другими экспериментальными данными. В качестве примера приведены результаты, полученные нами для чернозема и дерново-подзолистой почвы (рис. 4). В эксикаторе над чистой водой почвенные образцы влажностью 0.7–0.8 НВ теряют воду через паровую фазу. В то же время при контакте этих образцов с жидкой водой они увлажняются.

С позиции термодинамики потеря влажными почвами влаги в эксикаторе с водой объясняется гидрофобизацией капилляров. Для этого достаточно предположить перестройку Φ -кластеров

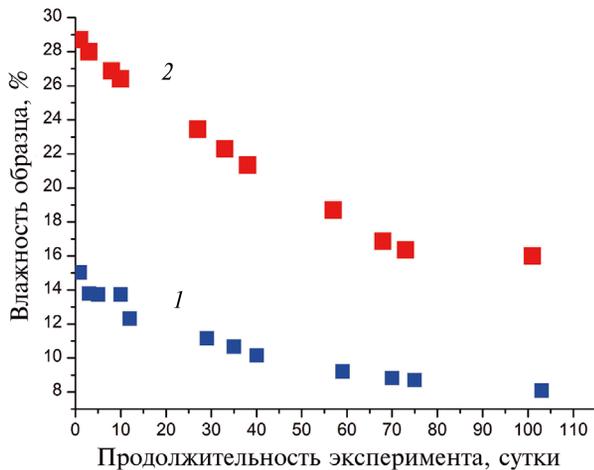


Рис. 4. Влияние длительности хранения дерново-подзолистой почвы (1) и чернозема (2) в эксикаторе над водой на определяемую влажность почв.

на поверхности капилляров, с которых испаряется вода.

Аналогичный физико-химический процесс перестройки белков наблюдается при взаимодействии с водой прорастающих семян [13]. Н.В. Обручева отметила существование предельных влажностей частей семян, по достижении которых активизируются биохимические процессы. Объяснены эти ключевые влажности были с позиций возможности изменения структур белков. После чего начинались процессы прорастания.

ВЫВОДЫ

1. Найден более простой лабораторный метод определения ВРК почв. Он заключается в определении зависимости вязкости паст от влажности почв, из которых их приготовили. Максимальное значение вязкости соответствует влажности в области ВРК.

2. Показано, что зависимость влажности почв от их электросопротивления не имеет экстремумов в области ВРК.

3. Обнаружено, что влажные почвы сохнут в эксикаторе над водой. Это объясняется гидрофобизацией почвенных гелей при потере почвой воды.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-14-00107.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
2. Тюлин А.Ф. Органно-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: АН СССР, 1958. 52 с.
3. Osterberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // European Biophysics J. 1992. V. 21(3). P. 163–167.
4. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
5. Senesi N., Rizzi F.R., Dellino P., Acquafredda P. Fractal humic acids in aqueous suspensions at various concentrations, ionic strengths, and pH values. Colloids and Surfaces A. // Physicochemical and Engineering Aspects. 1997. V. 127. Iss. 1–3. P. 57–68.
6. Senesi N., Rizzi F.R., Dellino P., Acquafredda P. Fractal dimension of humic acids in aqueous suspension as a function of pH and time // Soil Science Society of Am. J. 1996. V. 60. № 6. P. 1613–1678.
7. Федотов Г.Н., Добровольский Г.В. Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей // Почвоведение. 2012. № 8. С. 908–920.
8. Хайдапова Д.Д., Мищенко А.В., Карпова Д.В. Реологические свойства почв как одна из характеристик физической среды обитания растений // Агрофизика. 2022. № 1. С. 17–21.
9. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Ушкова Д.А., Горепекин И.В., Салимгареева О.А., Потапов Д.И. Гуминовые вещества и вязкость почвенных паст // ДАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. С. 119–123.
10. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Химия. 1982. 463 с.
11. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУЮ 1984. 204 с.
12. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеиздат. 1965. Т. 1. 664 с.
13. Обручева Н.В., Антипова О.В. Физиология и инициация прорастания семян // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 2. С. 287–302.

THREE-PHASE AND GEL MODELS OF SOILS IN THE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESULTS

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

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

[#]*E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

It is common to consider the results of experiments in soil physics from the position of a three-phase soil model. Along with the three-phase, there is a gel model of soils. The models are based on different principles: in the three-phase model – the constancy of the solid phase and the mobility of the liquid, in the gel model – the ability of soil gels to swell, harden and reduce the mobility of water. The purpose of the work is to assess the applicability of using three-phase and gel soil models to analyze the results of studying some physical properties of soils. The studies were carried out on the soils of the zonal series: sod-podzolic, gray forest, chernozem, chestnut soil. The following methods were used in the work: vibration viscometry, laser diffractometry, electrical resistance of soils. When studying the physical properties of soils, unexpected results were obtained. Firstly, the curve of the influence of the samples moisture content on the viscosity of the pastes prepared from them reached a maximum in the area of the moisture content of the point of limited availability of water (PLAW). Secondly, with increased mechanical action on soil pastes, the particle size in them did not decrease, but increased. Thirdly, the dependence of the electrical resistance of soils on their humidity maintains a uniform course in the area of PLAW. Although at this humidity, the continuous framework of the liquid phase in soils disappears, providing moisture and electrical conductivity. Fourth, moist soils dry out in a desiccator over water. It is not possible to explain these results from the standpoint of the three-phase soil model generally accepted in soil science. Therefore, a gel model of soils was used to analyze the results, which made it possible to explain all the results obtained.

Keywords: point of limited availability of water, soil drying, soil pastes, laser diffractometry, electrical resistance of soils, molecular associations of humic substances