

УДК 631.4

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ГЕЛЕЙ В ВЫСУШЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ПОЧВ

© 2024 г. Г. Н. Федотов*, член-корреспондент РАН С. А. Шоба,
Д. А. Ушкова, И. В. Горепекин, О. А. Салимгареева, А. И. Сухарев

Поступило 14.12.2023 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 11.03.2024 г.

Ранее установлено, что высушивание почв изменяет их свойства и, в частности, характеристики специфического органического вещества почв – гуминовых веществ (ГВ). ГВ – основа почвенных органоминеральных гелей, которые покрывают и связывают почвенные частицы. При удалении из почв воды происходит гидрофобизация и сжатие гелей, в результате чего свойства почвенных образцов могут меняться. Восстановление почвенных гелей воздушно-сухих образцов должно уменьшить расхождение данных, получаемых при изучении почвенных свойств высушенных и не подвергавшихся высушиванию образцов почв. Цель работы – поиск путей восстановления структуры почвенных гелей. Исследованы образцы 6 типов почв. В работе использовали методы вибрационной вискозиметрии, лазерной дифрактометрии, растровой электронной микроскопии (РЭМ), фотоколориметрии и кондуктометрии. Установлено, что высушивание почвенных образцов увеличивает размер надмолекулярных образований (НМО) из ГВ и снижает вязкость почвенных паст – параметр, характеризующий структуру и способность гелей к набуханию. Для восстановления структуры почвенных гелей предложено снижать размеры НМО из ГВ до исходных. Разделение НМО воздушно-сухих образцов проводили путём увлажнения почв и последующей обработкой различными воздействиями: температурой, ультразвуком и замораживанием. При помощи РЭМ показано, что нагрев и обработка ультразвуком не снижают, а увеличивают размер НМО. Увлажнение воздушно-сухих почв, выдержка во влажном состоянии на протяжении двух недель и последующее замораживание приближают вязкость паст ряда изученных почв к состоянию образцов, не подвергавшихся высушиванию. Этот процесс происходит за счёт возврата размера НМО к значениям исходных почв, о чём свидетельствуют данные по распределению размера взвешенных частиц на лазерном дифрактометре. Таким образом предложен метод восстановления гелевых структур в высушенных почвах до состояния исходных почв.

Ключевые слова: воздушно-сухие образцы почв, сухие и влажные почвы, вязкость почвенных паст, замораживание почв, коллоиды в почвах

DOI: 10.31857/S2686739724070198

Отбор полевых образцов является обязательным этапом лабораторного исследования почвенных свойств. С целью стандартизации данных изучение этих образцов проводят в воздушно-сухом состоянии [1]. Однако у высушивания почв на воздухе есть недостатки из-за изменения физических и химических свойств почвенных образцов при удалении влаги [2, 3]. Изменение структуры почвенных гелей – одно из таких свойств [3]. В частности, было показано [3], что при высушивании почв происходит укрупнение размера надмолекулярных образований (НМО) гуминовых веществ.

Восстановление почвенных гелей воздушно-сухих образцов должно уменьшить расхождение между данными, получаемыми при изучении высушенных и исходных образцов почв. Для этого нужно иметь ясные представления о структурной организации почв. В настоящее время существует две модели её структурной организации – классическая трёхфазная [4] и гелевая [3, 5].

С позиции трёхфазной модели почва представляет собой систему из трёх агрегатных состояний: твёрдого, жидкого и газообразного.

При высушивании почв в трёхфазной модели коагуляционные связи в твёрдой фазе необратимо переходят к кристаллизационно-конденсационным [4]. Например, при высушивании почв

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

выделяются нерастворимые вещества: алюмо- и железо-гуминовые гели [6]. Такой подход фактически отрицает возможность восстановления почвенной структуры после высушивания почв.

С позиции гелевой модели почва представляет собой аналогичную трёхфазной модели систему из трёх агрегатных состояний. Отличие заключается в наличии на поверхности твёрдой фазы гелевого слоя, который состоит из коллоидных частиц.

Минеральные почвенные коллоиды образуются при выветривании минералов [7] и стабилизируются органическим веществом почв за счёт электростатических взаимодействий, сил Ван-дер-Ваальса, гидрофобных сил, Н-связывания, образования катионных мостиков, хелатирования поверхностных ионов, лигандного обмена, а также стерических эффектов [8].

Почвенные коллоиды — твёрдые частицы в воде — могут существовать в виде золей и гелей. Золи — неустойчивые образования, которые при повышении температуры, ионной силы раствора, высушивании и других факторов коагулируют с образованием гелей [9]. Обратный переход из гелей в золи требует соблюдения условий для пептизации, которые трудно достижимы в почвах. Поэтому коллоиды в почвах, в основном, существуют в форме гелей.

Специфическое органическое вещество — гуминовые вещества, которые стабилизируют минеральные коллоиды, также существуют в виде частиц коллоидных размеров [10]. Эти частицы-молекулы взаимодействуют друг с другом, формируя (НМО), которые являются основой почвенных гелей.

В результате объединения органических и минеральных коллоидных частиц между собой и с более крупными минеральными частицами формируются органоминеральные плёнки-гели [5, 11]. Эти плёнки покрывают и связывают почвенные частицы разных размеров между собой, создавая почвенные отдельные части.

При высушивании почв в гелевой модели НМО гуминовых веществ взаимопроникают друг в друга, что приводит к увеличению размера НМО [3] и уплотнению органического вещества почв. Поэтому для возврата структуры почвенных гелей в состояние, предшествующее высушиванию, следует отделить НМО друг от друга.

Целью работы являлся поиск способов возврата в лабораторных условиях гелей воздушно-сухих образцов почв к свойствам образцов, не подвергавшихся высушиванию.

Способ восстановления структуры гелей приобретает ценность, если он подходит для разделения НМО в различных почвах. Поэтому в исследовании использовали образцы почв:

- дерново-подзолистой (Московская обл.);
- серой лесной (Владимирская обл.);
- серой лесной грунтово-глеевой (Тульская обл.);
- чернозёма выщелоченного (Орловская обл.);
- аллювиальной лугово-кислой (Тульская обл.);
- солонца светлого (Волгоградская обл.);

Для изучения НМО, существующих в почвах, использовали метод растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для изучения НМО, существующих в почвах, использовали метод растровой электронной микроскопии. Образцы для РЭМ готовили путём добавления 5 г почв к 100 г воды и перемешивания в течение часа. Для отделения органического вещества от неорганических и органоминеральных частиц использовали центрифугу Eppendorf 5804 (Германия), в которой образец центрифугировали в течение 10 минут при скорости 4000 об/мин. Отбирали из верхнего слоя центрифужных пробирок 1 миллилитр раствора и разбавляли в 1000–100000 раз. Из полученных растворов отбирали по 5 мкл, наносили их на поверхность атомно-гладкой слюды и высушивали на воздухе.

Электронно-микроскопическое исследование проводили при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL-6060A (“JEOL”, Япония) при ускоряющем напряжении 5 кВ. На образцы перед исследованием напыляли золото, используя установку JFC-1600 (“JEOL”, Япония).

Метод лазерной дифрактометрии использовали для изучения илистой и пылевой фракции почв. Образцы для лазерного дифрактометра готовили путём добавления 10 г почвы к 250 мл воды и перемешивания суспензии в течение 20 минут на магнитной мешалке. После этого отделяли крупные частицы на центрифуге Eppendorf 5804 (Германия) в течение 10 минут при скорости 2000 об/мин. Размеры частиц, остающихся во взвешенном состоянии в суспензиях, определяли при помощи лазерного дифрактометра Mastersizer 3000 фирмы “Malvern” (Великобритания).

Оптическую плотность образцов использовали для оценки содержания илистой и пылевой фракции почв. Процедура подготовки образцов была идентична описанной для дифрактометрии.

Оптическую плотность почвенных суспензий воздушно-сухих и исходных, т.е. не подвергавшихся высушиванию почв, определяли при помощи фотокolorиметра КФК-3 (Россия).

Удельную электропроводность почвенных суспензий использовали для сравнения прочности связи ионов в образцах почв, подвергавшихся и не подвергавшихся высушиванию. Процедура подготовки образцов была идентична описанной для дифрактометрии. Удельную электропроводность почвенных суспензий воздушно-сухих и исходных почв определяли при помощи измерителя электропроводности HANNA HI 98312 (Германия).

Для возврата воздушно-сухих почв к состоянию, которое было до высушивания, следует обеспечить подвижность частиц в гелях. Поэтому для поиска необходимого количества воды для ряда образцов изучены диапазоны влажностей:

- дерново-подзолистая почва – 16–32%;
- серая лесная почва – 24–42%;
- серая лесная грунтово-глеевая – 37%;
- чернозём выщелоченный – 24–40%;
- аллювиальная лугово-кислая – 39%;
- солонец светлый – 40%.

В пределах диапазона готовили образцы нескольких влажностей, выдерживали их во влажном состоянии, после чего готовили почвенные пасты. Влияние времени выдерживания влажных образцов на вязкость паст из этих образцов описано в результатах статьи.

Образцы выдерживали во влажном состоянии от 1 до 14 суток, после чего обрабатывали их различными способами:

- прогревом во влажном состоянии при 95°C^1 ;
- ультразвуком при использовании УЗ генератора МОД МЭФ 91.1 (ООО “МЭЛФИЗ–ультразвук”, Россия) в течение 30 минут при частоте 22 кГц и амплитуде 45 мкМ, интенсивность УЗ-воздействия 250 Вт/см^2 ;
- “замораживанием-оттаиванием”, которое проводили циклами при 20°C .

В качестве метода оценки возврата воздушно-сухих почв к состоянию до высушивания использовали вязкость почвенных паст, отражающую изменение наноструктурной организации

почв [12]. Связано это с тем, что чем больше НМО выходит из гелевой структуры и способно поглотить воду, тем выше вязкость образца.

Почвенные пасты готовили, перемешивая почву с необходимым количеством воды стеклянной палочкой 3–5 минут. Содержание воды в пастах варьировало от типа почв:

- дерново-подзолистая почва – 37%;
- серая лесная почва – 47%;
- серая лесная грунтово-глеевая – 50%;
- чернозём выщелоченный – 57%;
- аллювиальная лугово-кислая – 50%;
- солонец светлый – 47%.

Выбор содержания воды в пастах связан с нахождением их вязкости в оптимуме для измерения вискозиметром.

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

В основе почвенных гелей лежат взаимодействия между частицами-молекулами гуминовых веществ (ГВ) [3, 5], имеющих мозаичную дифильную поверхность [13] (рис. 1 А). Эти частицы-молекулы формируют НМО [10, 14, 15]. НМО могут различаться структурной организацией: до 100 нм они существуют в виде фрактальных кластеров (Ф-кластеров) (рис. 1 Б), а при больших размерах – выходят из интервала существования фрактальности (рис. 1 В). НМО, взаимодействуя между собой и минеральными частицами, образуют почвенные гели (рис. 1 Г). То есть, в основе гелевой модели лежат взаимодействия между частицами органического вещества.

Во влажных почвах гели представляют собой ажурные заполненные водой структуры. Их основа – НМО, ветви которых взаимодействуют между собой через гидрофобные участки. При высушивании образцов почв, прежде всего, изменяются почвенные гели, которые теряют воду. Процесс потери воды надмолекулярными образованиями должен приводить к их стягиванию, взаимопроникновению и укрупнению из-за снижения сил отталкивания между ионными атмосферами гидрофильных участков частиц-молекул ГВ. Данные по электронной микроскопии это подтверждают (рис. 2): размер НМО

¹Принятые в почвоведении 105°C применяют для высушивания почвенных образцов, что исключает движение НМО в гелях.

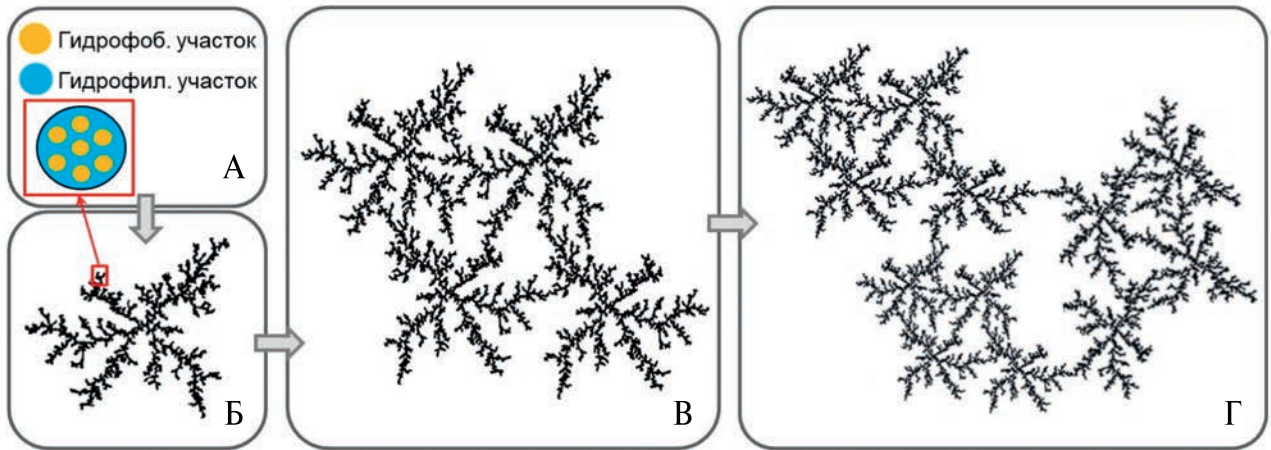


Рис. 1. Иерархическая модель наноструктурной организации почв. А – частицы-молекулы гуминовых веществ (ГВ); Б – фрактальный кластер из частиц-молекул ГВ; В – надмолекулярное образование из фрактальных кластеров; Г – фрагмент почвенного геля из надмолекулярных образований.

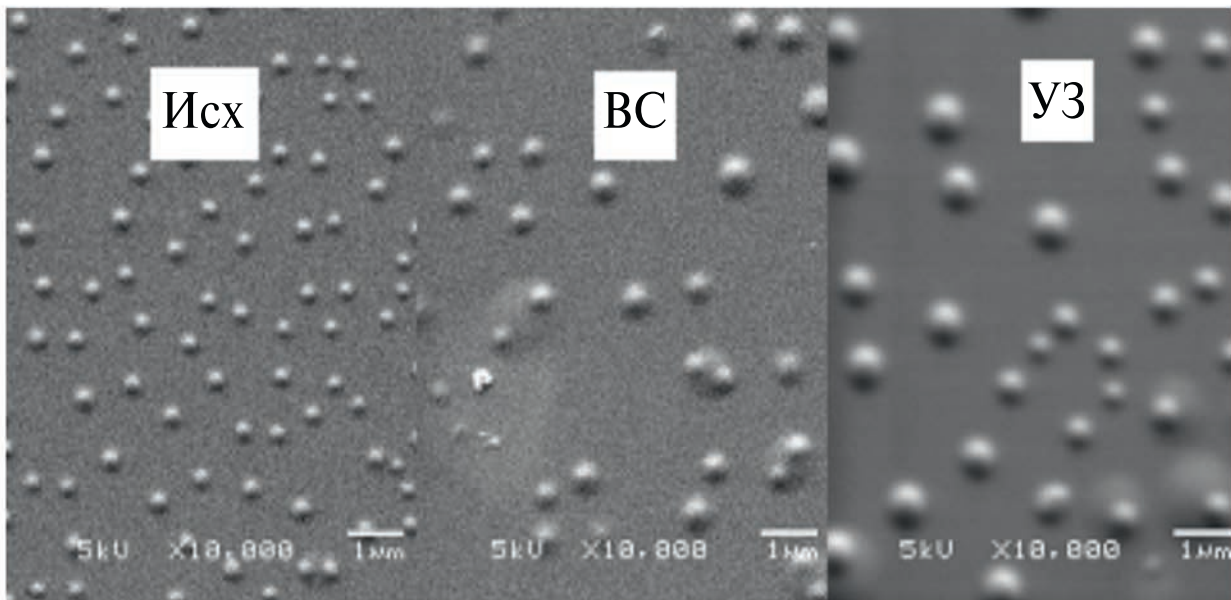


Рис. 2. Электронно-микроскопические фотографии НМО из образцов дерново-подзолистых почв Исх (исходный), ВС (воздушно-сухой) и УЗ (обработанный температурой и ультразвуком).

высушенных-увлажнённых почв больше, чем у исходных образцов.

При объединении НМО и укрупнении их размера в процессе высушивания обратная перестройка гелей в состояние, предшествующее высушиванию, должна сопровождаться отделением НМО друг от друга. Мы предположили, что возврат воздушно-сухой почвы к исходному состоянию можно осуществить с помощью введения дополнительной энергии в систему. Это

приведёт к отрыву НМО от гелевой структуры, и увеличению вязкости паст.

Для экспериментальной проверки этого предположения к воздушно-сухому образцу добавляли количество воды, необходимое для достижения влажности наименьшей влагоёмкости (НВ), которая обеспечит подвижность НМО. Полученный образец выдерживали в течение двух недель, предполагая, что за это время НМО и пространство между ними в гелях заполнится водой. Затем в систему вводили энергию: почву нагревали

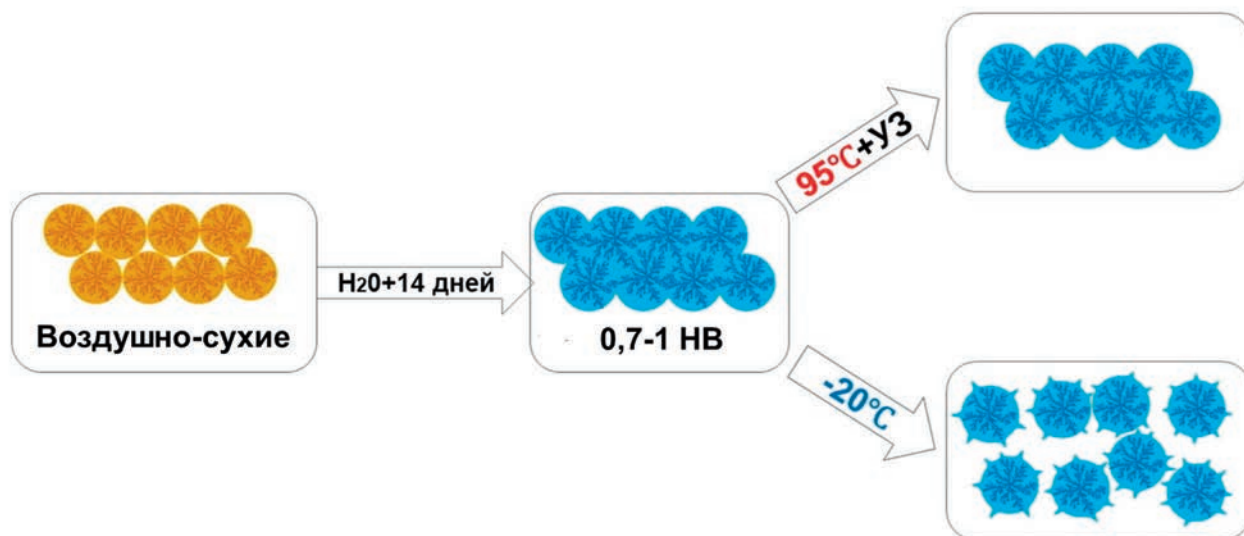


Рис. 3. Схема изменений системы из Φ -кластеров при различных воздействиях на неё.

до 95°C в течение суток. Полученный образец обрабатывали 10 мин на УЗ-генераторе, охлаждали при комнатной температуре и выделяли НМО из почв для РЭМ.

Проведённые эксперименты показали, что нагрев и УЗ-обработка почвенных паст приводили не к уменьшению, а укрупнению размеров НМО в почвах. То есть НМО не удаётся разделить (рис. 2). По-видимому, НМО не разделяются потому, что они преимущественно образованы гидрофобными связями, которые упрочняются с ростом температуры [16, 17].

Для предотвращения упрочнения гидрофобных связей в НМО механическое воздействие, разделяющие НМО, должно происходить без повышения или при понижении температуры. Опираясь на эту информацию, мы предположили, что при замораживании образцов будут происходить:

- снижение прочности связей между гидрофобными участками НМО из-за уменьшения температуры;
- разделение НМО при кристаллизации льда из-за роста его объёма по сравнению с водой и возникновения механических сил, отделяющих НМО друг от друга.

Работы по влиянию замораживания на почвенные свойства (прежде всего на водоустойчивость), если их рассматривать с позиций разрыва связей между НМО, это подтверждают [18, 19].

Возврат структуры почвенных гелей к их состоянию до высушивания путём замораживания мы проверили при помощи вибрационной вискозиметрии. Выбор метода связан с тем, что вязкость почвенных паст, обусловленная способностью гелей набухать, зависит от их строения [12]. Чем меньше НМО в гелях связаны между собой, тем сильнее гели должны набухать, вбирая в себя воду и увеличивая вязкость почвенных паст.

Эффект разделения НМО в гелях путём замораживания должен проявиться при максимальном заполнении НМО и пространства между ними водой. Эксперименты показывают, что при влажности для каждой почвы ниже определённой величины замораживание не влияет на изменение их вязкости (табл. 1–3). Поэтому для набухания почвенных гелей в образце почвы должно быть достаточное количество воды: от НВ и выше.

На следующем этапе исследования мы сравнили вязкость почвенных паст трёх образцов:

- не подвергавшихся высушиванию;
- воздушно-сухих;
- воздушно-сухих, увлажнённых и замороженных.

Результаты экспериментов на дерново-подзолистой, серой лесной почве и чернозёме показали (табл. 1–3), что вязкость высушенных образцов удаётся восстановить до значений образцов, не подвергавшихся высушиванию. Для этого

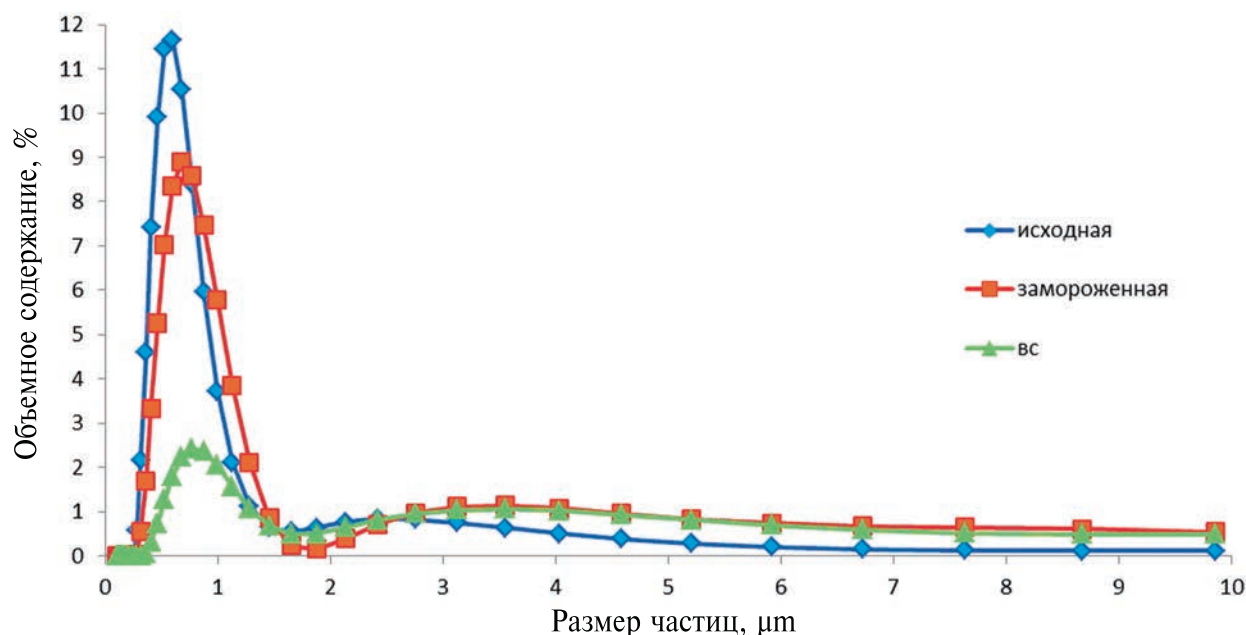


Рис. 4. Влияние пробоподготовки почв на распределение в ней частиц по размерам (чернозём). Исходная, воздушно-сухая (ВС), воздушно-сухая увлажнённая до НВ и подвергнутая замораживанию-оттаиванию (замороженная).

необходимо увлажнить образцы до наименьшей влагоёмкости (НВ) и выдержать 14 суток, после чего провести заморозку при -20°C .

Полученные результаты говорят о том, что при увлажнении воздушно-сухих почв до значений НВ влага равномерно распределяется по образцу в течение 14 суток, а последующая заморозка позволяет разорвать связи между НМО в почвенных гелях за счёт расширения заключённой в них воды. Схема этого процесса представлена на рис. 3.

На следующем этапе исследования мы проверили результаты вискозиметрии. Для этого методом лазерной дифрактометрии сравнили содержание частиц илистой фракции, а также мелкой и средней пыли в образце чернозёма: не подвергавшегося высушиванию, воздушно-сухого и восстановленного замораживанием. Результаты экспериментов показали (рис. 4), что замораживание приводит к заметному росту числа мелких частиц в восстановленном замораживанием почвенном образце по сравнению с его воздушно-сухим аналогом. Это подтверждает данные вискозиметрии: замораживание увлажнённых почв увеличивает количество свободных НМО, не связанных с почвенными гелями.

Сходные результаты были получены при изучении влияния восстановленных замораживанием

почвенных образцов на оптическую плотность приготовленных из них водных вытяжек. Замораживание приводит к увеличению оптической плотности вытяжек (табл. 4). Это согласуется с данными дифрактометрии: замораживание увеличивает долю частиц размером 3–10 мкм, которые повышают мутность суспензии.

Замораживание влажных почвенных образцов позволяет вернуть их структурную организацию к образцам почв, которые не подвергались высушиванию. Однако вернуть ионы в них в места исходного закрепления при помощи замораживания образцов не удаётся (табл. 4).

Таким образом, замораживание увлажнённых воздушно-сухих образцов чернозёма, серой лесной и дерново-подзолистой почв позволяет приблизить структурную организацию их гелей к состоянию образцов, не подвергавшихся высушиванию, однако, как показывают эксперименты (табл. 5), это восстановление характерно не для всех почв.

ВЫВОДЫ

1. При высушивании почвенных образцов происходит укрупнение выделяемых из них надмолекулярных образований гуминовых веществ.

Таблица 1. Влияние параметров процесса обработки образцов чернозёма на вязкость почвенных паст. Содержание воды в пасте 57%

№	Время после добавления в воздушно-сухую почву воды, сут	Влажность почвы после добавления в воздушно-сухую почву воды, %	Количество циклов “замораживание-оттаивание”	Вязкость пасты, мПа сек
Образец, не подвергавшийся высушиванию	Без добавления воды	Без добавления воды	0	3900±330
Воздушно-сухой образец	Без добавления воды	Без добавления воды	0	240±20
1	14	40	0	420±35
2	2	40	1	310±25
3	5	40	1	2150±180
4	10	40	1	4140±350
5	14	24	1	120±10
6	14	28	1	200±15
7	14	30	1	230±20
8	14	35	1	860±70
9	14	37	1	1620±140
10	14	40	1	3840±320
11	14	40	2	3550±300
12	14	40	3	2820±240
13	14	40	5	2400±200

Таблица 2. Влияние параметров процесса обработки образцов серой лесной почвы на вязкость почвенных паст. Содержание воды в пасте 47%

№	Время после добавления в воздушно-сухую почву воды, сут	Влажность почвы после добавления в воздушно-сухую почву воды, %	Количество циклов “замораживание-оттаивание”	Вязкость пасты, мПа сек
Образец, не подвергавшийся высушиванию	Без добавления воды	Без добавления воды	0	9000±760
Воздушно-сухой образец	Без добавления воды	Без добавления воды	0	1840±160
1	14	40	0	6000±500
2	2	40	1	4910±410
3	5	40	1	6420±540
4	10	40	1	6230±520
5	14	24	1	4000±340
6	14	28	1	4500±380
7	14	30	1	3630±300
8	14	35	1	7120±600
9	14	38	1	7580±640
10	14	40	1	9170±770
11	14	40	2	10130±850
12	14	42	3	9420±790

Таблица 3. Влияние параметров процесса обработки образцов дерново-подзолистой почвы на вязкость почвенных паст. Содержание воды в пасте 37%

№	Время после добавления в воздушно-сухую почву воды, сут	Влажность почвы после добавления в воздушно-сухую почву воды, %	Количество циклов “замораживание-оттаивание”	Вязкость пасты, мПа сек
Образец, не подвергавшийся высушиванию	Без добавления воды	Без добавления воды	0	1500±120
Воздушно-сухой образец	Без добавления воды	Без добавления воды	0	100±10
1	14	30	0	170±15
2	2	30	1	230±20
3	5	30	1	170±15
4	10	30	1	140±10
5	14	16	1	90±10
6	14	20	1	170±15
7	14	24	1	270±20
8	14	27	1	320±30
9	14	30	1	1200±100
10	14	32	2	1660±140
11	14	30	3	1250±100
12	14	30	5	1280±110

Таблица 4. Свойства водных вытяжек образцов чернозёма с разной пробоподготовкой

Свойства вытяжек	Чернозём		
	Исходный образец	Воздушно-сухой образец	Образец, обработанный замораживанием
Удельная электропроводность, мСм/см	0.07±0.01	0.13±0.01	0.17±0.02
Оптическая плотность	0.462±0.037	0.148±0.012	0.846±0.068

Таблица 5. Влияние насыщения водой образцов воздушно-сухих почв и их замораживания на вязкость приготовленных из них почвенных паст

Способ подготовки	Воздушно-сухой образец, мПа*сек	Воздушно-сухой, увлажнённый 14 суток и замороженный образец, мПа*сек
Образец Солонец светлый	340±29	330±25
Серая лесная грунтово-глеевая	1250±105	1100±100
Аллювиальная	9630±800	9580±800

2. Нагрев и УЗ-обработка укрупняют размер надмолекулярных образований гуминовых веществ и не позволяют вернуть организацию почвенных гелей к состоянию образцов, не подвергавшихся высушиванию.

3. Показана возможность восстановления замораживанием структурной организации почвенных гелей высушенных почв:

дерново-подзолистой, серой лесной почвы и чернозёма до состояния не подвергавшихся высушиванию образцов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 58595-2019 Почвы. Отбор проб. 8 с.
2. *Kaiser M., Kleber M., Berhe A. A.* How air-drying and rewetting modify soil organic matter characteristics: an assessment to improve data interpretation and inference // *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. V. 80. P. 324–340.
3. *Федотов Г. Н., Шеин Е. В., Ушкова Д. А., Салимгареева О. А., Горепекин И. В., Потапов Д. И.* Надмолекулярные образования из молекул гуминовых веществ и их фрактальная организация // *Почвоведение*. 2023. № 8. С. 903–910.
4. *Шеин Е. В.* Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
5. *Тюлин А. Ф.* Органно-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: АН СССР, 1958. 52 с.
6. *Александрова Л. Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.
7. *Cronan C. S., Cronan C. S.* *Mineral Weathering*. Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape. 2018. P. 87–100.
8. *Philippe A., Schaumann G. E.* Interactions of dissolved organic matter with natural and engineered inorganic colloids: a review // *Environmental science & technology*. 2014. V. 48. № 16. P. 8946–8962.
9. *Воюцкий С. С.* Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. 512 с.
10. *Senesi N., Wilkinson K. J.* Biophysical chemistry of fractal structures and processes in environmental systems. John Wiley & Sons, 2008. 342 p.
11. *Осинов В. И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: МГУ, 1979. 235 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. *Милановский Е. Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
14. *Osterberg R., Mortensen K.* Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // *European Biophysics Journal*. 1992. V. 21. P. 163–167.
15. *Angelico R., Colombo C., Di Iorio E., Brtnický M., Fojt J., Conte P.* Humic substances: from supramolecular aggregation to fractal conformation – Is there time for a new paradigm? // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. № 4. P. 2236.
16. *Вережников В. Н.* Взаимодействие поверхностно-активных веществ и олигомерных электролитов в водных растворах // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2012. № 1. С. 29–32.
17. *Doerr S. H., Shakesby R. A., Walsh R. P. D.* Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance // *Earth-Science Reviews*. 2000. V. 51. № 1–4. P. 33–65.
18. *Скворцова Е. Б., Шеин Е. В., Абросимов К. Н., Романенко К. А., Юдина А. В., Ключева В. В., Хайдапова Д. Д., Рогов В. В.* Влияние многократного замораживания-оттаивания на микроструктуру агрегатов дерново-подзолистой почвы (микротомографический анализ) // *Почвоведение*. 2018. № 2. С. 187–196.
19. *Dagesse D. F.* Freezing cycle effects on water stability of soil aggregates // *Canadian Journal of Soil Science*. 2013. V. 93. № 4. P. 473–483.

RESTORATION OF THE PROPERTIES OF ORGANOMINERAL GELS IN DRIED SOIL SAMPLES

**G. N. Fedotov[#], Corresponding Member of the RAS S. A. Shoba,
D. A. Ushkova, I. V. Gorepekin, O. A. Salimgareeva, A. I. Sukharev**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

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

It was previously established that soil drying changes their properties and, in particular, the characteristics of a specific soil organic substance – humic substances (HS). HS is the basis of soil organomineral gels that cover and bind soil particles. When water is removed from the soil, hydrophobization and compression of gels occur, as a result of which the properties of soil samples may change. The restoration of soil gels of air-dry samples should reduce the discrepancy between the data obtained when studying the soil properties of dried and non-dried soil samples. The purpose of the work is to find ways to restore the structure of soil gels. Samples of 6 types of soils were studied. Methods of vibration viscometry, laser diffractometry, scanning electron microscopy (SEM), photocolourimetry and conductometry were used in the work. It has been found that drying of soil samples increases the size of supramolecular formations (SMFs) from the soil and reduces the viscosity of soil pastes, a parameter characterizing the structure and ability of gels to swell. To restore the structure of soil gels, it is proposed to reduce the size of the SMFs from the HS to the initial ones. SMFs separation of air-dry samples was carried out by moistening the soils and subsequent treatment with various influences: temperature, ultrasound and freezing. Using SEM, it is shown that heating and ultrasound treatment do not reduce, but increase the size of the SMFs. Humidification of air-dry soils, exposure to moisture for 2 weeks and subsequent freezing bring the viscosity of pastes of a number of studied soils closer to the condition of samples that have not been dried. This process occurs due to the return of the SMFs size to the values of the initial soils, as evidenced by the data on the distribution of the size of suspended particles on a laser diffractometer. Thus, a method for restoring gel structures in dried soils to the state of the original soils is proposed.

Keywords: air-dry soil samples, dry and moist soils, viscosity of soil pastes, soil freezing, colloids in soils