

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА СВОЙСТВА ПОЧВ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

© 2024 г. Г. Н. Федотов<sup>а,\*</sup>, И. В. Горепекин<sup>а</sup>, Д. А. Ушкова<sup>а</sup>, У. А. Конкина<sup>а</sup>, А. И. Сухарев<sup>а</sup>,  
Д. И. Потапов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Факультет почвоведения, МГУ им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

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

Поступила в редакцию 24.03.2023 г.

После доработки 21.09.2023 г.

Принята к публикации 22.09.2023 г.

Гуминовые вещества оказывают влияния на ряд почвенных свойств: структурообразование, формирование емкости катионного обмена, повышение водоудерживающей способности и др. При этом в почвах и растворах гуминовые вещества существуют не в виде отдельных молекул, а в виде надмолекулярных образований, имеющих фрактально-кластерную организацию (Ф-кластеров). Следовательно, Ф-кластеры должны проявлять свое влияние на свойства почв. Так как эти образования прочно связаны между собой, для оценки их влияния на свойства почв необходимо их разделение. Это можно осуществить путем механоактивации – повышением реакционной способности (активности) веществ при их механической обработке. Целью исследования являлось изучение влияния механоактивации на некоторые свойства почв и на развитие в активированных почвах растений. Показано, что наименьшая влагоемкость образцов зональных типов почв при использовании механоактивации возрастает до 35% от исходной величины. Результаты объяснены с позиций снижения подвижности гравитационной воды Ф-кластерами в макрокапиллярах. Оптическая плотность водных вытяжек из чернозема возрастала на 75%, вязкость почвенных паст – на 57% за счет увеличения в почвенном растворе количества Ф-кластеров. Активированные почвы стимулировали прорастание семян пшеницы на 26%. Этот эффект может быть связан с образованием на поверхности семян пленок из Ф-кластеров, которые закрепляют почвенные аллелотоксины, замедляющие развитие семян.

*Ключевые слова:* почвенные гели, надмолекулярные образования из гуминовых веществ, фрактальные кластеры из гуминовых веществ, электронная микроскопия Ф-кластеров, наименьшая влагоемкость почв, вискозиметрия почвенных паст

DOI: 10.31857/S0032180X24020042, EDN: ХУМТОА

### ВВЕДЕНИЕ

Гуминовые вещества (ГВ) – специфическое органическое вещество почв, обеспечивающее их существование посредством выполнения целого ряда функций [4, 27, 28]: структурообразование, формирование емкости катионного обмена, повышение водоудерживающей способности и др.

Существуют различные теории образования ГВ: макромолекулярная [4], супрамолекулярная-комплементарная [6, 18], супрамолекулярная-мицеллярная [25]. В основе макромолекулярной модели лежит представление о том, что все части молекул ГВ соединены между собой ковалентными связями. Другой подход состоит в рассмотрении ГВ с позиции супрамолекул, образованных из низкомолекулярных веществ за счет слабых взаимодействий по

принципу ключ–замок (супрамолекулярная-комплементарная) или за счет образования гидрофобных ядер с гидрофильной периферией (супрамолекулярная-мицеллярная).

С появлением концепции почвенного континуума существование ГВ перестали рассматривать только с позиции высокой устойчивости образуемых гуминовых соединений [16, 21]. В этой модели особое внимание было уделено физико-химическим факторам внешней среды, позволяющим легко разлагаемым соединениям, таким как сахара, сохраняться на протяжении длительного времени, тогда как время жизни более устойчивых производных лигнина может исчисляться месяцами [16, 21]. Это поставило под сомнение корректность модели макромолекулярного строения

ГВ, при этом существование ГВ в виде супрамолекул не противоречило данному подходу.

Отметим, что все эти теории рассматривают только формирование молекул ГВ (частиц-молекул<sup>1</sup>) и не направлены на изучение и объяснение возникновения из них надмолекулярных образований (НМО), существование которых для ГВ было показано в работах [17, 22–24].

Анализ исследований в области установления природы этих НМО показывает [19, 20, 24], что все компоненты гуминовых веществ: гуминовые кислоты (ГК), фульвокислоты (ФК) и гумин организованы фрактально. Причем прочность связей между молекулами, определяемая путем установления критических концентраций агрегирования, показала, что уже при концентрации 1 мг/л отдельные молекулы ГК стремятся к организации в НМО, которая завершается при концентрациях 10–30 мг/л [2, 14, 15]. Обращает на себя внимание, что при изучении влияния концентрации растворов ГВ на развитие микроорганизмов наблюдается ускорение их развития на несколько порядков при уменьшении концентрации в растворах ГВ до величины менее 10–30 мг/л [26]. Обнаруженное совпадение концентрационных пределов вряд ли является случайным. Можно предположить, что потребление ГВ микроорганизмами происходит с большей скоростью в растворах с концентрацией ниже предела агрегирования.

Отметим, что информация о фрактально-кластерной организации ГВ была получена в исследованиях химиков при изучении растворов ГВ. Однако непосредственное изучение образцов почв различных типов, проведенное при использовании метода малоуглового рассеяния нейтронов показало [10], что для них всех характерна фрактальная организация (интервал существования фракталов и их фрактальная размерность) коллоидной составляющей почв – почвенных гелей в том же размерном диапазоне. Из представленной выше информации о строении НМО гуминовых веществ в растворах и фрактальной организации почвенных гелей можно было заключить, что ГВ в почвах имеют фрактально-кластерную (Ф-кластерную) организацию.

Представляло определенный интерес изучение влияния на объекты, содержащие Ф-кластеры ГВ, механических воздействий – механоактивации, которая является мощным средством интенсификации процессов химической технологии [11].

<sup>1</sup> Применение термина “частица-молекула”, на наш взгляд, более корректно по сравнению с термином “молекула”. Связано это с тем, что при появлении термина молекула ГК, у большинства почвоведов в воображении возникает структурная химическая формула из работ Д.С. Орлова. При этом на второй план отходит то, что эта молекула является частицей, имеет размер, форму, межфазную поверхность раздела и определенные свойства этой поверхности.

В частности, применяют механохимическую активацию и для выделения ГВ из торфа. После такой обработки выход ГВ из торфа увеличивается в 1.5 раза [3].

С современных позиций Ф-кластерной организации ГВ почв можно ожидать, что механоактивация гумусосодержащих субстратов должна заключаться в повышении подвижности в них Ф-кластеров из частиц-молекул ГВ за счет разрыва связей между Ф-кластерами.

Целью исследования являлось изучение влияния механоактивации почвенных образцов на некоторые свойства почв.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования взяты дерново-подзолистая почва (Московская область), серая лесная почва (Тульская область), чернозем выщелоченный (Орловская область), а также яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорт Гранни.

Механоактивацию почв осуществляли путем разрушения почвенных агрегатов влажностью примерно 0.7–0.8 наименьшей влагоемкости (НВ) при их продавливании пестиком с резиновым наконечником через сита с разным диаметром отверстий (2, 3, 5 и 7 мм). Это позволяло разрушать крупные агрегаты до более мелких, перевода Ф-кластеры в активное состояние, не изменяя гранулометрического состава почвенных образцов, так как разрыв связей должен был идти по пленкам гелям, покрывающим и связывающим почвенные частицы [7].

Электронно-микроскопическое исследование проводили при помощи растровых электронных микроскопов (РЭМ) JEOL-6060A (фирмы Jeol, Япония) и Zeiss Leo Supra при ускоряющем напряжении 2–5 кВ. На образцы перед исследованием напыляли золото, используя установку JFC-1600 (фирмы JEOL, Япония).

Образцы для РЭМ готовили путем добавления 5 г почв или почвенных паст к 100 г воды и перемешивания в течение 1 ч. После этого отделяли частицы с большей плотностью центрифугированием на центрифуге Eppendorf 5804 (Германия) в течение 10 мин при скорости 4000 об./мин. Отбирали из верхнего слоя центрифужных пробирок несколько миллилитров и разбавляли в 1000–100000 раз. Из полученных растворов отбирали по 5 мкл, наносили их на поверхность атомно-гладкой слюды и высушивали на воздухе.

В работе использовали сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) ФемтоСкан (фирмы ООО “Центр перспективных технологий”, Россия). Изображения обрабатывали с помощью программного обеспечения ФемтоСкан Онлайн [13]. Отличие при подготовке образцов для СТМ по сравнению с РЭМ состояло в том, что образец

после напыления золотом дополнительно сушили инфракрасной лампой при температуре 90°C в течение 10 мин.

Определение НВ проводили по методике [1], заключающейся в:

- помещении нарушенного образца влажностью 0.7–0.8 НВ в алюминиевую трубочку диаметром 40 мм и высотой 100 мм;

- его виброуплотнении до примерно постоянного насыпного веса;

- насыщении образцов в трубочках в течение суток до полной влагоемкости помещением в стакан с водой;

- удалении из образцов гравитационной воды путем постановки их на влажный песок на 3 сут.

Влажность определяли, выгружая каждый образец из трубочки в фарфоровый тигель, тщательно перемешивая его и помещая часть образца в прибор для определения влажности почв фирмы Ohaus MB23 (США). Эксперименты проводили в 3-кратной повторности. Основное отличие от методики А.Ф. Вадюниной состояло в использовании не воздушно-сухих, а влажных образцов почв.

Определение оптической плотности почвенных растворов (вытяжек из почв) проводили при помощи колориметра КФК-3. Растворы готовили, переводя из 20 г почвы в 100 г воды плохо закрепленные в почвенном образце Ф-кластеры и обломки гелей при слабом перемешивании в течение 1 мин, и удаляя после этого более крупные минеральные частицы из вытяжки центрифугированием на центрифуге Eppendorf 5804. Эксперименты проводили в 3-кратной повторности.

Вязкость почвенных паст определяли при помощи вибрационного вискозиметра фирмы AND SV-10 (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. Пасты из чернозема готовили, добавляя в почву воду до ее содержания в пасте 57%, и перемешивали в течение 1 мин стеклянной палочкой. Эксперименты проводили в 3-кратной повторности.

Для оценки влияния активации почв и действия гуматов на стимуляцию (угнетение) прорастания семян и развития их проростков использовали методику, базирующуюся на измерении суммарной длины проростков массивов семян [8]. В основе методики лежит существование линейной зависимости между разницей в насыпных объемах в воде проросших и непроросших семян от суммарной длины их корней и ростков. Эксперименты проводили в 6-кратной повторности с последующим расчетом доверительного интервала (95% доверительная вероятность) в программе Origin Pro.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования для проверки реальности существования выделения Ф-кластеров из почв и получения более детальных представлений о них провели микроскопическое изучение Ф-кластеров при различных, в том числе очень высоких увеличениях. На рис. 1, а представлены НМО (Ф-кластеры) из чернозема выщелоченного при увеличении  $\times 5000$  размером от 300 до 800 нм. Эти результаты соответствовали ранее полученным данным [12]. При увеличении  $\times 100000$  видно (рис. 1b), что каждая наблюдаемая при масштабировании  $\times 5000$  частица представляет собой кластер, образованный из нескольких сотен частиц размером от 30 до 50 нм. Эти частицы, согласно данным СТМ, позволяющим использовать

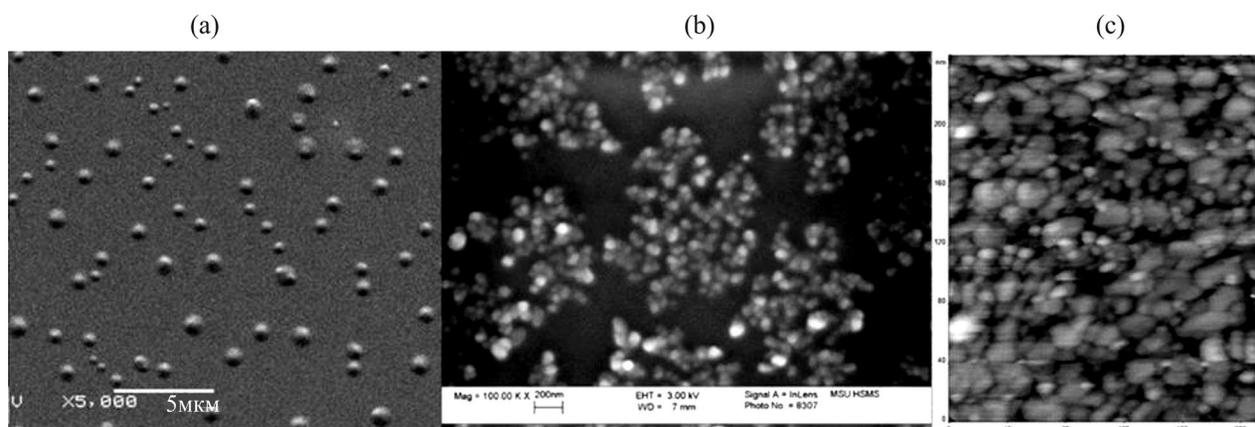


Рис. 1. Снимки выделенных из чернозема выщелоченного надмолекулярных образований, полученные при помощи растрового электронного микроскопа (а, b) и сканирующего туннельного микроскопа (с).

увеличение миллион раз и выше, состоят из субчастиц размером около 10 нм (рис. 1с).

На основании полученных данных можно сделать вывод, что фрактальные кластеры из ГВ размером 300–800 нм реально существуют в почвах и имеют трехуровневую организацию: частицы-молекулы ГВ (субчастицы) размером около 10 нм формируют первичные кластеры 30–50 нм, которые образуют кластеры второго порядка 300–800 нм. Отметим, что для почв и грунтов многоуровневая организация известна и характерна для частиц глинистых минералов: 2–4-слойные пакеты объединяются в ультрамикроагрегаты, которые собираются в микроагрегаты, а из последних уже образуются агрегаты [5].

На следующем этапе работы было изучено влияние механоактивации на физические свойства почвенных образцов. При этом необходимо было получить ответы на следующие вопросы:

— Влияет ли механоактивация почв на их физические свойства?

— Влияет ли механоактивация почв на развитие в них растений?

— Какова природа влияния механоактивации почв на развитие в них растений?

Увеличение количества  $\Phi$ -кластеров в почвенном растворе должно заметно повышать оптическую плотность вытяжек, приготовленных из почв, активированных продавливанием через сито 2 мм. Эксперименты показали, что оптическая плотность вытяжек из подвергнутой механическому воздействию чернозема оказалась примерно на 75% выше ( $0.145 \pm 0.03$  и  $0.082 \pm 0.018$ ). При этом было установлено, что через сутки после механоактивации эффект воздействия практически полностью исчезает.

Еще одна проверка перехода  $\Phi$ -кластеров в почвенный раствор в результате механоактивации почв была проведена путем изучения влияния механоактивации на вязкость паст, получаемых из почвенных образцов. Основана эта проверка была на увеличении вязкости паст при росте в них количества частиц. Хорошо видно (рис. 2), что с уменьшением размера сит, через которые продавливали почвы, их вязкость, а, следовательно, и количество частиц в них возрастают. Для этого свойства также было установлено, что через сутки после механоактивации эффект воздействия практически полностью исчезает.

Снижение подвижности воды в почвенных макрокапиллярах должно приводить к замедлению стока гравитационной влаги из почвенных образцов. Как следствие, величина НВ, определяемая по методике Вадюниной [1], должна возрастать.

Из представленных данных видно, что увеличение количества активных  $\Phi$ -кластеров в почвенном

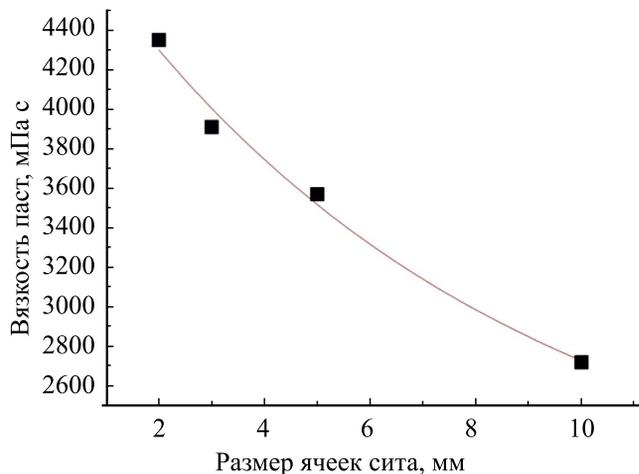


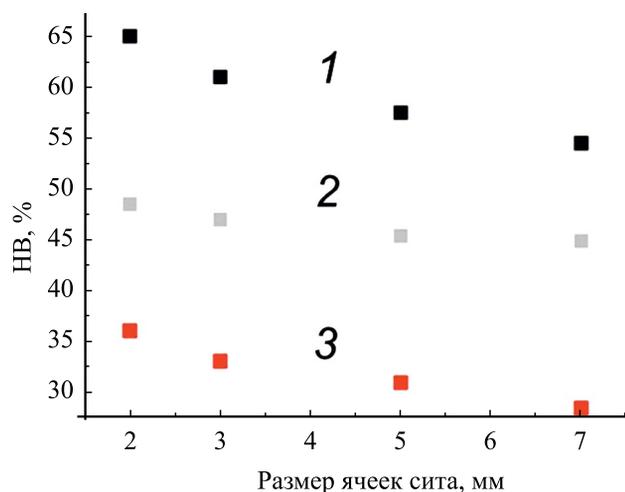
Рис. 2. Влияние активации продавливанием влажного чернозема через сита с разным размером ячеек на вязкость приготовленных из этих образцов паст.

образце, полученное за счет роста степени измельчения почвенных агрегатов (рис. 3) приводит к увеличению их НВ.

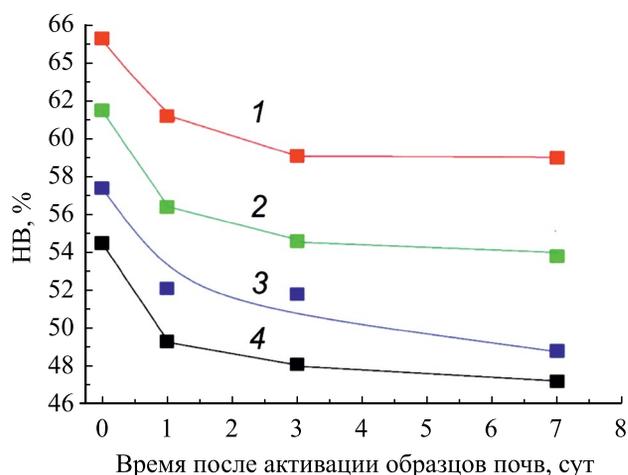
Можно ожидать, что после механического воздействия на почву  $\Phi$ -кластеры не могут долго находиться в активном состоянии, обязательно должны существовать механизмы для “стока” избыточной энергии. В результате после механического воздействия на почвы определяемая величина НВ во времени должна снижаться, что подтверждается экспериментально на черноземе, дерново-подзолистой и серой лесной почвах<sup>2</sup>. В качестве примера приведены результаты для чернозема, на котором указанные закономерности проявились наиболее сильно (рис. 4).

Таким образом, проведенное исследование подтвердило, что в результате механического воздействия на почвы влажностью 0.7–0.8 НВ происходит их механоактивация, заключающаяся в отрыве  $\Phi$ -кластеров от почвенных гелей и в их переходе в почвенный раствор. Однако подобное состояние существует не долго. Оно исчезает за сутки при определении количества  $\Phi$ -кластеров в почвенных

<sup>2</sup> Для объяснения наблюдаемых для НВ явлений можно использовать два подхода. Первый основан на трехфазной физической модели почв, т.е. объяснении с позиций изменений структуры образца — распределения капилляров по размерам. Второй подход основан на учете существования в почвах почвенных гелей. Для объяснения влияния продавливания через сита разного размера на величину НВ подход с позиции изменения структуры, в принципе, применим (хотя и вызывает сомнения), но он совершенно непригоден для объяснения влияния на НВ времени, прошедшего после активации почвенных образцов, так как их структура от времени меняться не должна.



**Рис. 3.** Влияние механоактивации продавливанием влажных почв через сита с разным размером ячеек на НВ насыпных образцов почв: 1 – чернозем; 2 – серая лесная почва; 3 – дерново-подзолистая почва.



**Рис. 4.** Снижение во времени наименьшей влагоемкости образцов чернозема, активированных продавливанием через сита с размером ячеек: 2 (1), 3 (2), 5 (3) и 7 (4) мм.

**Таблица 1.** Стимуляция прорастания семян яровой пшеницы сорт Гранни при активации чернозема без обработки семян

Субстрат	Воздействие на развитие семян, %
Песок	0
Чернозем неактивированный	$-31 \pm 3$
Чернозем, активированный продавливанием через сито 2 мм	$-13 \pm 2$

вытяжках и при оценке влияния Ф-кластеров на вязкость почвенных паст, т.е. при прямом воздействии увеличения числа Ф-кластеров в почвенном растворе на изучаемые свойства почв. При этом влияние механоактивации почв на их НВ проявляется в течение значительно более продолжительного времени. Объяснить наблюдаемые различия можно, предположив, что процесс увеличения НВ происходит сразу после механоактивации, путем перехода Ф-кластеров в те точки системы, в которых их нахождение приводит к росту НВ. Все остальные действия по определению НВ, по-видимому, являются способом проявления этого влияния. Это значит, что Ф-кластеры в почвенных образцах после механоактивации почв занимают такое положение, которое обеспечивает рост НВ почвенных образцов. Однако более детальные представления о механизме процесса у нас пока отсутствуют.

Было интересно рассмотреть влияние механоактивированных почв на развитие в них растений. Исследование было проведено с использованием семян пшеницы. Основываясь на том, что время проведения этого эксперимента составляет 2 сут,

а активность Ф-кластеров за сутки практически полностью исчезает, можно было заранее предположить, что если освободившиеся при механоактивации Ф-кластеры сразу не займут положения, которое обеспечит стимуляцию прорастания, то обнаружить стимулирующий эффект не удастся.

Из представленных данных видно (табл. 1), что развитие семян на черноземе происходит примерно на 31% медленнее по сравнению с их развитием на песке. Это свидетельствует о нахождении в черноземе аллелотоксинов, замедляющих развитие семян. Хорошо видно, что активация чернозема приводит к снятию ингибирования и заметной стимуляции развития семян. Стимуляция в активированном черноземе относительно неактивированного чернозема достаточно велика и составляет 26%, что исключает возможность ошибочных выводов, так как ошибка определения суммарной длины проростков составляет 7 при 95% доверительной вероятности.

Объяснение наблюдаемого эффекта, на наш взгляд, состоит в том, что в активированных почвах после активации присутствует избыточное

количество свободных Ф-кластеров, которые могут перемещаться по почвенному образцу. Учитывая стремление Ф-кластеров закрепляться на свободных поверхностях [9], можно предположить, что Ф-кластеры сразу после активации почвы закрепляются на семенах, образуя на них сорбционный защитный слой, который снижает поступление из почв в семена аллелотоксинов. Снижение ингибирования семян аллелотоксинами, по-видимому, обеспечивает стимуляцию прорастания семян.

### ВЫВОДЫ

1. Фрактальные кластеры из ГВ размером несколько сот нанометров реально существуют в почвах и имеют трехуровневую организацию: частицы-молекулы ГВ (субчастицы) размером около 10 нм формируют первичные кластеры 30–50 нм, которые образуют кластеры второго порядка 300–800 нм.

2. При механическом воздействии на почву Ф-кластеры активируются, частично переходя в почвенный раствор, что приводит к снижению подвижности воды в почвенных образцах и увеличивает оптическую плотность вытяжек из почв, вязкость почвенных паст и наименьшую влагоемкость почвенных образцов.

3. Семена пшеницы развиваются в механоактивированных почвах заметно быстрее.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 400 с.
2. *Евдокимов И.П., Лосев А.П.* Природные нанообъекты в нефтегазовых средах. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2008. 104 с.
3. *Ломовский О.И., Болдырев В.В.* Механохимия в решении экологических задач. Аналитический обзор. Новосибирск, 2006. 221 с.
4. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 325 с.
5. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
6. Супрамолекулярная химия: Концепции и перспективы / Пер. с англ. Болдыревой Е.В. Новосибирск: Наука. Сиб. отд. РАН, 1998. 334 с.
7. *Тюлин А.Ф.* Органично-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.
8. *Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Позднякова А.Д., Завгородняя Ю.А., Исакова С.А.* Взаимосвязь предыстории использования и химических свойств почв с их аллелотоксичностью // Почвоведение. 2020. № 3. С. 379–386. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2003003X>
9. *Федотов Г.Н., Добровольский Г.В.* Возможные пути формирования нано- и микроструктур в гумусовых веществах почвенных гелей // Почвоведение. 2012. № 8. С. 908–920.
10. *Федотов Г.Н., Третьяков Ю.Д., Иванов В.К., Кузлин А.И., Пахомов Е.И., Исламов А.Х., Початкова Т.Н.* Фрактальные коллоидные структуры в почвах различной зональности // Доклады АН. 2005. Т. 405. № 3. С. 351–354.
11. *Шелаева Т.Б.* Механохимическая активация стекольной шихты. Дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 133 с.
12. *Шоба С.А., Шейн Е.В., Ушкова Д.А., Грачева Т.А., Салимгареева О.А., Федотов Г.Н.* Физико-химические аспекты водостойчивости почв // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 508. С. 139–143.
13. *Яминский И.В., Ахметова А.И., Мешков Г.Б.* Программное обеспечение “ФемтоСкан Онлайн” и визуализация нанообъектов в микроскопии высокого разрешения // Наноиндустрия. 2018. Т. 11. № 6. С. 414–416.
14. *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? // Appl. Sci. 2023. V. 13. № 4. P. 2236.
15. *Fasurova N., Cechlovska H., Kucerik J.* A comparative study of South Moravian lignite and standard IHSS humic acids’ optical and colloidal properties // Petroleum and Coal. 2006. V. 48. № 2. P. 24–32.
16. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // Nature. 2015. V. 528. P. 60–68.
17. *Osterberg R., Mortensen K.* Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // Eur. Biophys. J. 1992. V. 21. № 3. P. 163–167.
18. *Piccolo A., Pietramellara G., Mbagwu J.S.C.* Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability // Geoderma. 1997. V. 75. № 3–4. P. 267–277.
19. *Rice J.A., Lin J.S.* Fractal nature of humic materials // Environ. Science Technology. 1993. V. 27. № 2. P. 413–414.
20. *Rice J.A., Tombacz E., Malekani K.* Applications of light and X-ray scattering to characterize the fractal

- properties of soil organic matter // *Geoderma*. 1999. V. 88. № 3–4. P. 251–264.
21. Schmidt M., Torn M., Abiven S. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. V. 478. P. 49–56.
  22. 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 Sci. Soc. Am. J.* 1996. V. 60. № 6. P. 1613–1678.
  23. 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. // Physicochem. Engineer. Aspects*. 1997. V. 127. № 1–3. P. 57–68.
  24. Senesi N., Wilkinson K.J. *Biophysical chemistry of fractal structures and processes in environmental systems*. John Wiley & Sons, 2008. 342 p.
  25. Sutton R., Sposito G. Molecular structure in soil humic substances: The new view // *Environ. Sci. Technol.* 2005. V. 39. № 23. P. 9009–9015.
  26. Visser S.A. Physiological action of humic substances on microbial cells // *Soil Biol. Biochem.* 1985. V. 17. № 4. P. 457–462.
  27. Yang F., Tang C., Antonietti M. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms // *Chem. Soc. Rev.* 2021. V. 50. № 10. P. 6221–6239.
  28. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artemyeva Z.S., Kogut B.M. Humic substances: hypotheses and reality (a review) // *Eurasian Soil Science*. 2021. V. 54. P. 1826–1854.

## The Effect of Mechanical Activation on Some Soil Properties and Plant Development

G. N. Fedotov<sup>1</sup>\*, I. V. Gorepekin<sup>1</sup>, D. A. Ushkova<sup>1</sup>, U. A. Konkina<sup>1</sup>,  
A. I. Sukharev<sup>1</sup>, and D. I. Potapov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

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

Humic substances effect on a number of soil properties: structure formation, formation of cation exchange capacity, increase in water retention capacity, etc. At the same time, humic substances in soils and solutions do not exist in the form of individual molecules, but in the form of molecular associations having a fractal-cluster organization (F-clusters). Therefore, F-clusters should exert their influence on the properties of soils. Since these formations are strongly interconnected, their separation is necessary to assess their influence on soil properties. This can be done by mechanical activation – increasing the reactivity (activity) of substances during their mechanical processing. The aim of the paper was to study the effect of mechanical activation on some soil properties and on the development of plants in activated soils. It is shown that the field moisture capacity of samples of zonal soil types when using mechanical activation increases to 35% of the initial value. The results are explained from the standpoint of reducing the mobility of gravitational water by F-clusters in macrocapillaries. The optical density of aqueous extracts from chernozem increased by 75%, the viscosity of soil pastes increased by 57% due to an increase in the number of F-clusters in the soil solution. Activated soils stimulated wheat seed germination by 26%. This effect may be associated with the formation of films of F-clusters on the surface of seeds, which fix soil allelotoxins that slow down the development of seeds.

*Keywords:* soil gels, supramolecular formations of humic substances, fractal clusters of humic substances, electron microscopy of F-clusters, the lowest moisture capacity of soils, viscometry of soil pastes