

ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ПАСТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ В НИХ ВОДЫ И ИСХОДНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Г.Н. Федотов¹✉, Д.А. Тарасенко¹, И.В. Горепекин^{1,2}, Ю.П. Батырев³

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, Факультет почвоведения МГУ

²Евразийский центр по продовольственной безопасности (Аграрный центр МГУ), Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

³ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

gennadiy.fedotov@gmail.com

Изучено влияние высушивания почв и влажности, до которой увлажняли почвенные образцы, а также механического воздействия на пасты на их вязкость. Целью исследования являлось изучение и объяснение наблюдаемых явлений с позиций физической и гелевой моделей почв. Исследования проводили на образцах, отобранных из гумусово-аккумулятивных горизонтов чернозема, дерново-подзолистой и серой лесной почв. Вязкость почвенных паст определяли при помощи вибрационного вискозиметра, а для изучения размера почвенных частиц в пастах использовали лазерный дифрактометр. Установлено, что при росте величины механических воздействий на почвенные пасты по достижении своего для каждой почвы предела происходит увеличение вязкости почвенных паст, называемое в коллоидной химии реопексией. Показано, что реопексия характеризуется ростом размера частиц в почвенных пастах. Обнаружено, что влажность, которую почвенный образец имел перед приготовлением пасты, влияет на вязкость паст сложным образом: для изученных образцов почв наблюдаются два максимума вязкости паст. Один из них близок к почвенной гидрологической константе влажности разрыва капилляров, а второй — к наименьшей влагоемкости.

Ключевые слова: реопексия почвенных паст, размер частиц в почвенных пастах, влажность разрыва капилляров, наименьшая влагоемкость

Ссылка для цитирования: Федотов Г.Н., Тарасенко Д.А., Горепекин И.В., Батырев Ю.П. Изменение вязкости паст в зависимости от содержания в них воды и исходной влажности почвенных образцов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 94–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-94-103

Для объяснения изменений в физических свойствах почв при высушивании принято использовать трехфазную модель ее структурной организации [1]. В основе трехфазной модели лежит представление о постоянстве твердой фазы и подвижности жидкой.

Высушивание почв в трехфазной модели сопровождается удалением воды из капилляров и сцеплением почвенных частиц, которые необратимо меняют тип взаимодействия: с коагуляционных на конденсационные и кристаллизационные связи [1, 2].

Процесс высушивания подробно изучен для глинистых минералов. При высокой скорости высыхания они неравномерно деформируются [3, 4]. Это способствует развитию трещин. Более низкая скорость сушки приводит к большей вариации распределения пор по размерам [3].

Наряду с трехфазной моделью в настоящее время для объяснения экспериментальных результатов стали использовать гелевую модель почв. Она основана на том, что почвенные отдельные частицы состоят из более мелких частиц, покрытых и связанных между собой почвенными органоминеральными гелями [5, 6]. В состав гелей входят минеральные коллоиды [7], образующиеся при выветривании [8], которые стабилизируются гуминовыми веществами [9–12].

Гуминовые вещества имеют многоуровневую структурную организацию: первичные частицы-молекулы гуминовых веществ размером 2...10 нм объединяются во фрактальные кластеры (Ф-кластеры) размером 100...200 нм [13–15]. Возникновение Ф-кластеров и их объединение с образованием органической составляющей гелей происходит благодаря мозаичной гидрофильно-гидрофобной поверхности частиц-молекул гуминовых веществ [16].

Гелевая модель почв послужила основанием для введения не только понятия «гелевый слой», но и связанного с ним представления о кинетически несвободной воде [17] — воде, включенной в гели. Высушивание почв в гелевой модели приводит к удалению обоих типов влаги: кинетически свободной воды в капиллярах вне гелей и связанной воды, включенной в гели. Потеря воды гелями приводит к изменению их структуры — уплотнению и усадке [6]. Из проведенного сравнения высушивания почв с позиций трехфазной и гелевой моделей почв следует, что, несмотря на различные подходы, обе модели сходны в том, что при высушивании почв усиливаются органо-минеральные взаимодействия. Это согласуется с данными других исследователей [18].

Рассмотрим с позиций двух моделей процесс увлажнения почв. С позиции трехфазной модели основные изменения при увлажнении почв связаны с изменением их объема, который определяется содержанием воды, соотношением пор по размерам, формой пор и емкостью катионного обмена. Например, чем больше влажность образца и способность глинистых минералов к набуханию, тем больше объем образующегося порового пространства [19]. Кристаллизационные и конденсационные связи, которые возникли на этапе высушивания, не сменяются полностью на коагуляционные, поэтому изменения физических свойств почв в трехфазной модели носят необратимый характер.

Гелевая модель почв не отрицает роли содержания воды, соотношения порового пространства и типа глинистых минералов в изменении физических свойств почв, происходящем при увлажнении. Она дополняет эти представления, делая акцент на коллоидной фракции частиц глинистых минералов и гуминовых веществ, которые при взаимодействии образуют гелевые структуры, способные к набуханию.

Одним из приемов изучения структуры почвенных частиц является вискозиметрия. В физике почв этот метод применяют для изучения почвенных паст [20–24]. Исследования по изучению вязкости часто проводят на воздушно-сухих образцах почв, увлажненных в течение одних суток [25, 26]. С позиции трехфазной модели вязкость почвенных паст определяется взаимодействием между частицами твердой фазы в воде, а в гелевой модели — соотношением кинетически свободной и связанной воды в почвах [17].

Цель работы

Цель работы — изучение влияния влажности высушенных до воздушно-сухого состояния и вновь увлажненных почв на вязкость приго-

товленных из них паст, попытка объяснения наблюдаемых явлений с позиций физической и гелевой моделей почв.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования использовали отобранные из гумусоаккумулятивных горизонтов образцы почв зонального ряда:

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

Гранулометрический состав дерново-подзолистой почвы соответствовал легкосуглинистому, серой лесной — среднесуглинистому, чернозема — тяжелосуглинистому.

Определение вязкости почвенных паст. Нерастертые образцы почв были предварительно высушены до воздушно-сухого состояния, опять увлажнены до разных влажностей и выдержаны в герметично закрытой емкости при температуре 26...28 °C не менее двух недель.

Измерение влажности почв проводили на влагомере ОHAUS MB25.

Пасты готовили, добавляя воду к почвам и перемешивая их в течение 1 мин с помощью мешалки MLW MR25 при скорости 200 и 1200 об./мин.

Содержание воды в пастах для каждой используемой почвы подбирали экспериментально, для того, чтобы вязкость паст находилась в наиболее чувствительном диапазоне работы вискозиметра. Для дерново-подзолистой почвы это соответствовало 37 %, для серой-лесной — 47, для чернозема — 57 %.

Для определения вязкости паст использовали вибрационный вискозиметр SV-10. 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.

Определение размера частиц в почвенных пастах методом дифрактометрии. Суспензии готовили, добавляя 10 г пасты к 250 мл воды и перемешивая суспензию 20 мин. Затем суспензию центрифугировали 10 мин при скорости 2000 об./мин, чтобы избавиться от минеральных частиц. После центрифугирования для определения размера частиц использовали лазерный дифрактометр.

Определение наименьшей влагоемкости почв. При определении наименьшей влагоемкости использовали алюминиевые трубки

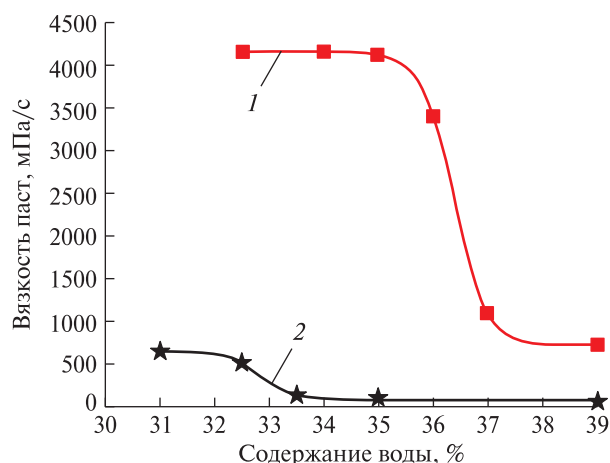


Рис. 1. Вязкость почвенных паст, приготовленных из разных образцов дерново-подзолистой почвы, в зависимости от содержания в них воды: 1 — исходная; 2 — воздушно-сухая

Fig. 1. Viscosity of soil pastes prepared from different samples of sod-podzolic soil depending on their water content: 1 — initial; 2 — air-dry

диаметром 40 мм и длиной 100 мм. Насыпной образец помещали в трубку и осуществляли виброуплотнение. Затем насыщали образцы водой снизу до полной влагоемкости в течение одних суток. После этого образцы помещали на влажный песок на 3 сут. для стекания гравитационной влаги [27]. Определение проводили в трехкратной повторности.

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментальных работ получили результаты по вязкости почвенных паст, приготовленных из почв, не подвергавшихся высушиванию (исходных) и высушенных до воздушно-сухого состояния (рис. 1). Вязкость паст измеряли сразу после внесения в образцы воды и перемешивания мешалкой при скорости 200 об./мин.

При содержании воды в пастах на уровне 39 % вязкость пасты из исходной почвы составляла порядка 750 мПа/с, а из воздушно-сухой — 100 мПа/с. С уменьшением содержания воды вязкость обоих образцов резко увеличивалась по достижении порогового значения: для образца из исходной почвы — 37 %, для воздушно-сухого — 33,5 %. Для образца из исходной почвы скачок вязкости изменялся с 1000 мПа/с до более 4000 мПа/с, для воздушно-сухого — с 100 мПа/с до 700 мПа/с. Характерно, что при равных содержаниях воды в пастах почвы, не подвергавшиеся высушиванию, имели большую вязкость по сравнению с воздушно-сухими (см. рис. 1).

Получаемые на вибрационном вискозиметре результаты можно трактовать с помощью уравнения Эйнштейна для вязкости суспензий [28]

$$\eta = \eta_0 (1 + 2,5\phi),$$

где η — вязкость суспензии;

η_0 — вязкость растворителя;

ϕ — объемная доля твердой фазы;

2,5 — коэффициент для сферических твердых частиц.

Это уравнение применяется при изучении вязкости суспензий гуминовых веществ [29].

Из физического смысла этой формулы следует, что вязкость почвенных паст определяется объемной долей в них твердой фазы или обратной величиной — объемной долей кинетически свободной воды. Следует обратить внимание, что размер твердых частиц в данной зависимости напрямую не фигурирует и может оказывать влияние на вязкость паст только опосредованно через объемную долю кинетически свободной воды.

Для паст из исходной и воздушно-сухой почвы при одинаковом содержании воды, например 35 %, массовая доля твердой фазы не отличается. Хотя различия в вязкости паст свидетельствуют об обратном: объемные доли твердой фазы и кинетически свободной воды в них разные. Для исходной почвы вязкость превышает 4000 мПа/с, а для воздушно-сухой находится на уровне 100 мПа/с.

С позиций физической модели почв и набухания глинистых минералов в дерново-подзолистой почве объяснить эти результаты достаточно сложно, так как состав минералов исходной и воздушно-сухой почв идентичен.

С позиции гелевой модели почв возможностей для объяснения значительно больше, поскольку увеличение вязкости может быть связано с уменьшением доли свободной воды при набухании почвенных гелей. Вода входит в гели, теряет подвижность и формально увеличивает объем твердой фазы почв. Аналогичный подход применяют, объясняя изменение вязкости полиэлектролитов [28]. Минимальный объем молекулы в состоянии клубка имеют в изоэлектрической точке. Минимальной объем соответствует наименьшей вязкости. При появлении избытка положительных или отрицательных зарядов клубки разбухают и включают в свой состав свободную до этого времени воду. Это приводит к увеличению вязкости.

Данные растровой электронной микроскопии, представленные в работе [6], это подтверждают: фрактальные (Ф-кластеры) из гуминовых веществ и надмолекулярные образования из них, составляющие почвенные гели, при

высушивании взаимопроникают одно в другое и увеличиваются в размерах. Это приводит к уменьшению суммарного внутреннего объема гелей, способного удерживать воду, что объясняет низкие значения вязкости воздушно-сухих образцов почв.

В целях лучшего понимания полученных результатов и происходящих в почвенных пастах процессов на следующем этапе исследования было решено уточнить, как механическое воздействие (перемешивание паст) влияет на их вязкость. Для этого перед измерением пасты обрабатывали на мешалке MLW MR25 при различной скорости: от 200 до 1200 об./мин.

Из представленных данных следует (рис. 2), что по достижении определенной интенсивности механического воздействия на пасты их вязкость изменяется. Для дерново-подзолистой почвы это воздействие достигается при скорости 400 об./мин, для серой лесной почвы и чернозема — 200 об./мин. Увеличение вязкости паст при усилении механического воздействия свидетельствует о явлении реопексии, которое ранее было отмечено для паст из дерново-подзолистых почв и черноземов [30].

Существующее объяснение реопексии в трехфазной модели заключается в высокой доле конденсационно-кристаллизационных связей внутри агрегатов [13]. Однако этот тип связей начинает преобладать в почвах при высушивании, когда они сменяют коагуляционные контакты. Тогда неясно, почему на образцах, не подвергавшихся высушиванию, мы получаем результаты, свидетельствующие о реопексии.

С позиции гелевой модели можно предложить другое объяснение реопексии. Почвенные органоминеральные гели состоят из «кирпичиков» — надмолекулярных образований из глинистых минералов и гуминовых веществ [6]. Эти органоминеральные образования связаны между собой благодаря различным типам связей [11, 31]: электростатических взаимодействий, сил Ван-дер-Ваальса, гидрофобных сил, *H*-связывания, образования катионных мостиков, хелатирования поверхностных ионов и лигандного обмена.

Механическое воздействие мешалки работает в сторону разрыва этих связей. Можно ожидать, что по достижении критического значения числа оборотов надмолекулярные образования будут отделяться одно от другого и вновь соединяться при выключении мешалки. Процесс их объединения будет сопровождаться связыванием свободной воды.

Большим плюсом гелевой модели является возможность экспериментальной проверки предлагаемого с ее позиций объяснения. В указанном случае это подтверждают данные

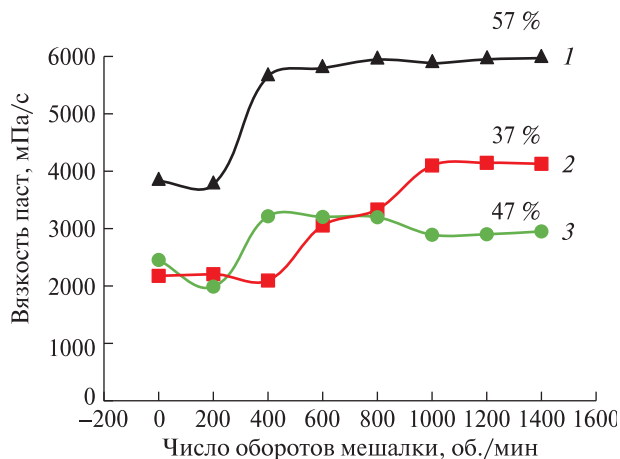


Рис. 2. Влияние величины механического воздействия на вязкость паст, приготовленных из образцов исходных почв: чернозема (1); дерново-подзолистой (2); серой лесной (3) (в процентах указано содержание воды в пастах)

Fig. 2. Effect of the magnitude of mechanical impact on the paste's viscosity prepared from samples of initial soils: chernozem (1); sod-podzolic (2); grey forest (3) (the percentage indicates the water content in the pastes)

лазерной дифрактометрии — размер частиц в пастах, обработанных при скорости 1200 об./мин, заметно возрастает по сравнению со скоростью 200 об./мин [32]. Кроме того, образующиеся фрагменты гелей взаимодействуют с достаточно крупными 100...150 мкм почвенными частицами пасты, увеличивая их размеры. Исходя из этого можно заключить, что вязкость почвенных паст определяется долей свободной воды, которая остается в пастах после набухания почвенных гелей. С точки зрения механизма значение полученных результатов заключается в том, что перемешивание паст приводит к разрушению, перегруппировке и самоорганизации в ней коллоидных частиц, являющихся строительными элементами, из которых строятся почвенные гели.

При рассмотрении практической составляющей полученных по реопексии результатов можно сделать вывод о том, что почвы могут функционировать как реопексные системы.

На следующем этапе исследования изучено влияние влажности воздушно-сухих почвенных образцов на реологические свойства полученных из них почвенных паст. Образцы увлажняли до влажности 37 % для дерново-подзолистой почвы и 57 % для чернозема, выдерживали во влажном состоянии в течение 14 дней, после чего готовили пасты с добавлением воды. Пасты перемешивали при скорости 200 и 1200 об./мин и определяли их вязкость.

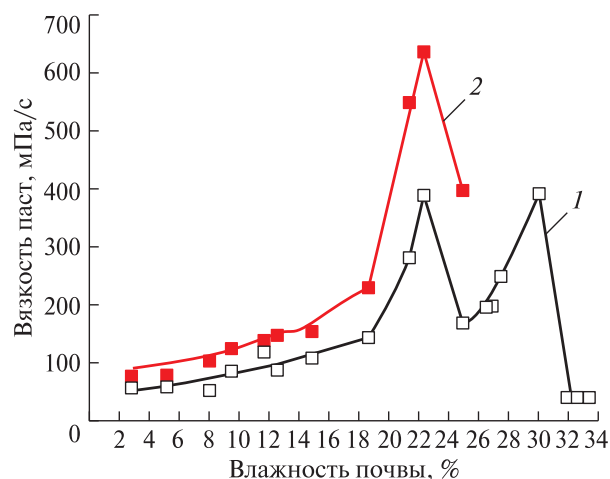


Рис. 3. Изменение вязкости паст с содержанием воды 37 %, приготовленных из образцов дерново-подзолистой почвы разных влажностей: 1 — обработка пасты 1 мин на мешалке при скорости 200 об./мин; 2 — обработка пасты 1 мин при скорости 1200 об./мин

Fig. 3. Variation of pastes viscosity with water content of 37 %, prepared from samples of sod-podzolic soil of different moisture contents: 1 — paste processing for 1 min on a stirrer at a speed of 200 rpm; 2 — paste processing for 1 min at a speed of 1200 rpm

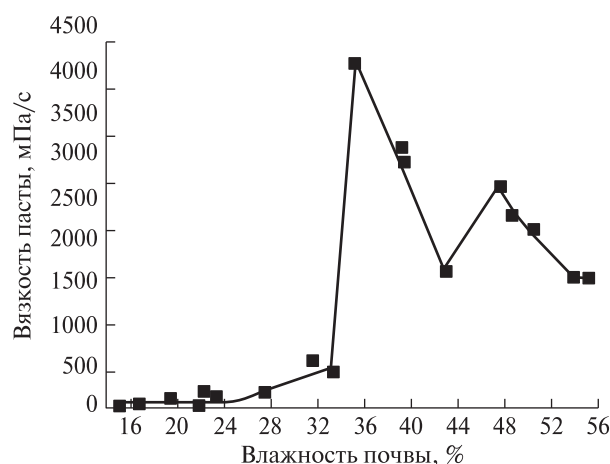


Рис. 4. Изменение вязкости паст с содержанием воды 57 %, приготовленных из образцов чернозема разной влажности

Fig. 4. Variation of pastes viscosity with water content of 57 %, prepared from samples of chernozem of different moisture content

Эксперименты показали, что вязкость всех исследованных почвенных паст имеет два ярко выраженных максимума: для дерново-подзолистой почвы — при влажности 22 и 31 %, для чернозема — при 34 и 48 % (рис. 3, 4). Усиление интенсивности перемешивания паст приводит

к увеличению их вязкости (реопексия), при этом максимумы сохраняются и становятся более выраженными. Эти экстремумы вязкости не связаны с прочностью частиц, поскольку измельчение частиц не влияет на их объем, а увеличение вязкости обусловлено ростом доли твердой фазы [17].

С точки зрения влияния гуминовых веществ на вязкость паст можно предположить, что наличие двух максимумов связано с различными структурными состояниями гуминовых веществ в растворах. Оно основано на существовании в растворах различных форм гуминовых веществ [33–35]: частиц-молекул, надмолекулярных образований, мицелл. Установлены значения критической концентрации, при которых происходит переход между этими структурными состояниями:

- критическая концентрация гуминовых веществ в растворе, выше которой происходит объединение частиц-молекул гуминовых веществ в Ф-кластеры, составляет порядка десятков миллиграммов на литр [35];

- критическая концентрация агрегации, выше которой гуминовые вещества находятся в растворе в виде агрегатов, т. е. надмолекулярных образований, составляет сотни миллиграммов на литр;

- критическая концентрация мицеллообразования, выше которой гуминовые вещества находятся в растворе в виде мицелл, составляет единицы граммов на литр [34].

Критические концентрации, приведенные выше, объясняются влиянием итоговых значений на состав гуминовых веществ, водородный показатель (pH) растворов, содержание в них многозарядных катионов и других примесей [34].

В почвах в интервале между влажностью разрыва капилляров и наименьшей влагоемкостью концентрация гуминовых веществ в пересчете на имеющуюся в почве воду составляет около 100 г/л. С позиции приведенных выше значений критической концентрации гуминовые вещества должны существовать в виде мицелл. Увеличение количества воды в почвах может влиять на состояние системы «вода — гуминовые вещества» в сторону разбавления и перехода от мицелл к надмолекулярным образованиям и далее к Ф-кластерам. Подобные изменения должны отражаться на размере почвенных частиц, покрытых органоминеральными гелями.

В целях проверки корректности данного объяснения на образцах чернозема в точках с влажностью, соответствующей максимуму и минимуму вязкости почвенных паст, с помощью лазерного дифрактометра был определен

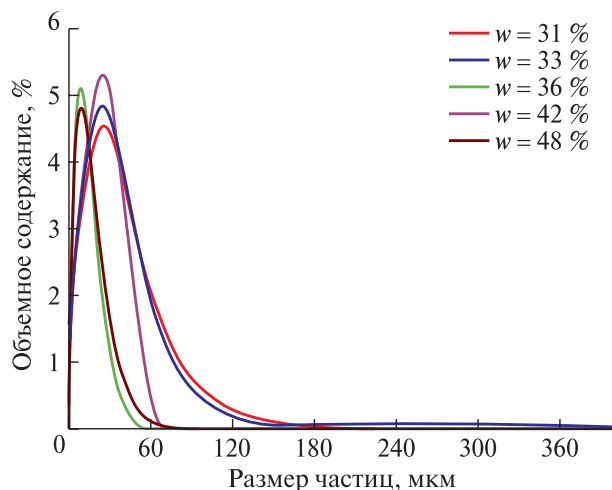


Рис. 5. Влияние влажности почв на распределение частиц по размеру в образцах чернозема

Fig. 5. Influence of soil moisture on particle size distribution in chernozem samples

размер органоминеральных частиц, приготовленных из образцов, взятых в точках экстремумов (рис. 5). Полученные данные показали, что в точках, соответствующих максимуму вязкости (36 и 48 %), размер органоминеральных частиц заметно меньше по сравнению с точками, соответствующими минимуму вязкости. Это свидетельствует о структурных перестройках, которые сопровождаются распадом и образованием новых органоминеральных частиц. Возникновение напряжения в веществах в результате избыточного поглощения воды хорошо известно и ведет к распаду таких образований до частиц меньших размеров с более равновесной структурой [36–39]. При влажности 31...33 % в черноземе имеются наиболее крупные среди изученных органоминеральных частиц (см. рис. 4). С ростом влажности почв до 36 % они распадаются и образуют частицы меньшего размера. Этот процесс сопровождается включением свободной воды и повышением вязкости паст. Дальнейшее увеличение влажности до 42 % ведет к набуханию этих частиц и увеличению их размера. Когда напряжение, вызванное набуханием, приводит к новому распаду частиц, они вновь собираются, однако их размер при этом уменьшается. Процесс нового объединения сопровождается включением в состав образующихся органоминеральных частиц кинетически свободной воды, что приводит к увеличению вязкости паст. Количество таких циклов ограничено, с одной стороны, количеством форм гуминовых веществ: мицелл — надмолекулярных образований — Ф-кластеров, с другой — избыток свободной воды может

сглаживать значения экстремумов вязкости, делая их достоверно неразличимыми.

Предлагаемое объяснение основано на включении кинетически свободной воды в состав почвенных гелей, что объясняет повышение вязкости паст в солевых растворах и явление реопексии, показанное в работе [32]. Однако точные границы критических концентраций гуминовых веществ пока остаются неясными. В связи с этим приведенный механизм имеет общий характер и нуждается в дальнейшем уточнении.

Выводы

1. При высушивании почв Ф-кластеры гуминовых веществ, являющиеся основой почвенных гелей, взаимопроникают один в другой, при этом прочность связей между ними возрастает и они включают в свой состав меньше воды.

2. При росте механических воздействий на почвенные пасты по достижении своего для каждой почвы предела происходит увеличение вязкости почвенных паст, называемое в коллоидной химии реопексией, возникающей вследствие роста размера частиц в почвенных пастах с включением в них кинетически свободной воды.

3. При изучении влияния влажности почвенных образцов на вязкость приготавливаемых из них паст для всех изученных образцов почв установлено существование двух скачков вязкости паст, один из которых близок к влажности разрыва капилляров, а второй — к наименьшей влагоемкости.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 22-14-00107.

Список литературы

- [1] Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 430 с.
- [2] Николаева И.В., Початкова Т.Н., Манучаров А.С. Влияние азотных удобрений и известкования на реологические свойства дерново-подзолистых почв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2008. № 2. С. 31–35.
- [3] Kong L., Kong L.W., Wang M., Guo A.G., Wang Y. Effect of drying environment on engineering properties of an expansive soil and its microstructure // J. of Mountain Science, 2017, v. 14, pp. 1194–1201.
- [4] Tang C.S., Cui Y.J., Shi B., Tang A.M., Liu C. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles // Geoderma, 2011, v. 166, no. 1, pp. 111–118.
- [5] Тюлин А.Ф. Органоминеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 52 с.

- [6] 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.
- [7] Lehmann P., Leshchinsky B., Gupta S., Mirus B.B., Bickel S., Lu N., Or D. Clays are not created equal: How clay mineral type affects soil parameterization // *Geophysical Research Letters*, 2021, t. 48, no. 20, p. e2021GL095311.
- [8] Cronan C.S., Cronan C.S. Mineral Weathering // *Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape*, 2018, pp. 87–100.
- [9] Di Iorio E., Circelli L., Angelico R., Torrent J., Tan W., Colombo C. Environmental implications of interaction between humic substances and iron oxide nanoparticles: A review // *Chemosphere*, 2022, v. 303, p. 135172.
- [10] Kurochkina G.N. The effect of humic acid adsorption on the coagulation stability of soil suspensions // *Eurasian Soil Science*, 2020, v. 53, pp. 62–72.
- [11] Philippe A., Schaumann G.E. Interactions of dissolved organic matter with natural and engineered inorganic colloids: a review // *Environmental science & technology*, 2014, v. 48, no. 16, pp. 8946–8962.
- [12] Xu Z., Niu Z., Pan D., Zhao X., Wei X., Li X., Wu W. Mechanisms of bentonite colloid aggregation, retention, and release in saturated porous media: role of counter ions and humic acid // *Science of The Total Environment*, 2021, v. 793, p. 148545.
- [13] 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, no. 4, p. 2236.
- [14] Osterberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // *European Biophysics J.*, 1992, v. 21(3), pp. 163–167.
- [15] Wilkinson K.J., Senesi N. *Biophysical Chemistry of Fractal Structures and Processes in Environmental Systems*. John Wiley & Sons, 2008, 323 p.
- [16] Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 186 с.
- [17] 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.
- [18] 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, pp. 324–340.
- [19] Estabragh A.R., Parsaei B., Javadi A.A. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil // *Soils and foundations*, 2015, v. 55, no. 2, pp. 304–314.
- [20] Аbruкова Л.П. Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях // *Почвоведение*, 1970. № 3. С. 104–114.
- [21] Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 151 с.
- [22] Манучаров А.С. К использованию реологических исследований в почвоведении // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*, 1983. № 3. С. 40–56.
- [23] Baumgarten W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales. Habilitation thesis, Kiel University, 2013, 263 p.
- [24] Lal R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability // *Soil Tillage Res.*, 1993, v. 27, pp. 1–8.
- [25] 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.
- [26] Честнова В.В. Реологические свойства черноземов типичных курской области: взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой: дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2017. 116 с.
- [27] Методическое руководство по изучению почвенной структуры / под ред. И.Б. Ревута, А.А. Роде. Л.: Колос, 1969. 528 с.
- [28] Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1982. 463 с.
- [29] Kawahigashi M., Sumida H., Yamamoto K. Size and shape of soil humic acids estimated by viscosity and molecular weight // *J. of colloid and interface science*, 2005, v. 284, no. 2, pp. 463–469.
- [30] Умарова А.Б., Бутылкина М.А., Сусленкова М.М., Александрова М.С., Ежелев З.С., Хмелева М.В., Шхапацев А.К., Гасина А.И. Агрегатная структура естественных и пахотных почв разного генезиса: морфологические и реологические характеристики // *Почвоведение*, 2021. Т. 55. № 9. С. 1019–1032.
- [31] Galicia-Andrés E., Oostenbrink C., Gerzabek M.H., Tunega D. On the adsorption mechanism of humic substances on kaolinite and their microscopic structure // *Minerals*, 2021, v. 11, no. 10, p. 1138.
- [32] Fedotov G.N., Shoba S.A., Ushkova D.A., Gorepekin I.V., Sukharev A.I., Potapov D.I. Three-Phase and Gel Models of Soils in the Analysis of Experimental Results // *Doklady Earth Sciences*, 2024, v. 515, pp. 453–457.
- [33] Линкевич Е.В., Юдина Н.В., Савельева А.В. Формирование гуминовых коллоидов в зависимости от pH среды водных растворов // *Журнал физической химии*, 2020. Т. 94. № 4. С. 568–573.
- [34] Тарасевич Ю.И., Доленко С.А., Трифонова М.Ю., Алексеенко Е.Ю. Ассоциация и коллоидно-химические свойства гуминовых кислот в водных растворах // *Коллоидный журнал*, 2013. Т. 75. № 2. С. 230–236.
- [35] Fasurová N., Cechlovská H., Kucerik J. A comparative study of South Moravian lignite and standard IHSS humic acids, optical and colloidal properties // *Petroleum & coal*, 2006, v. 48, no. 2, pp. 24–32.
- [36] Волкова Н.Н., Джардималиева Г.И., Крисюк Б.Э., Чуканов Н.В., Шершнев В.А., Шилов Г.В. Механохимическое разрушение кристаллогидратов ацетилендикарбоксилатов кобальта и цинка при дегидратации // *Известия Академии наук. Серия химическая*, 2016. № 8. С. 2025–2033.
- [37] Мифтахова Н.Ш., Петрова Т.П., Рахматуллина И.Ф. Кристаллы. Кристаллогидраты. Казань: Изд-во Казанского государственного технологического университета, 2006. 24 с.
- [38] Спецов Е.А., Александрова Ю.В., Мальцева Н.В., Власов Е.А. Исследование влияния механохимического активирования на свойства гиббсита // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 2013. № 18 (44). С. 008–010.
- [39] Chen X., Wu Q., Gao J., Tang Y. Hydration characteristics and mechanism analysis of β -calcium sulfate hemihydrate // *Construction and Building Materials*, 2021, v. 296, p. 123714.

Сведения об авторах

Федотов Геннадий Николаевич✉ — д-р биол. наук, вед. науч. сотр. факультета почвоведения МГУ, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», gennadiy.fedotov@gmail.com

Тарасенко Дарья Александровна — студент, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ushkova_dasha@mail.ru

Горепекин Иван Владимирович — канд. биол. наук, науч. сотр. факультета почвоведения МГУ, науч. сотр. Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», decembrist96@yandex.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), batyrev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 17.10.2024.

Одобрено после рецензирования 21.11.2024.

Принята к публикации 26.05.2025.

CHANGE IN PASTE VISCOSITY DEPENDING ON WATER CONTENT AND INITIAL MOISTURE CONTENT OF SOIL SAMPLES

G.N. Fedotov¹✉, D.A. Tarasenko¹, I.V. Gorepekin^{1, 2}, Yu.P. Batyrev³

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

²Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1, p. 12, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

³BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

gennadiy.fedotov@gmail.com

The effect of soil drying and the humidity to which soil samples were moistened, as well as the mechanical effect of pastes on their viscosity, was studied. The purpose of the study was to explain the observed phenomena from the standpoint of physical and gel models of soils. The studies were carried out on samples taken from humus-accumulative horizons of chernozem, sod-podzolic and gray forest soils. The viscosity of the soil pastes was determined by using a vibrating viscometer, and a laser diffractometer was used to study the size of the soil particles in the pastes. It has been established that with an increase in the magnitude of mechanical effects on soil pastes, upon reaching its limit for each soil, an increase in the viscosity of soil pastes occurs, called rheopexy in colloidal chemistry. It has been shown that rheopexy is characterized by an increase in the particle size in soil pastes. It was found that the moisture content of the soil sample before the preparation of the paste affects the viscosity of pastes in a complex way: for the studied soil samples, two maximum viscosities of pastes are observed. One of them is close to the soil hydrological moisture constant of capillary rupture, and the second is close to the lowest moisture capacity.

Keywords: reopexy of soil pastes, particle size in soil pastes, point of limited availability of water, lowest moisture capacity

Suggested citation: Fedotov G.N., Tarasenko D.A., Gorepekin I.V., Batyrev Yu.P. *Izmenenie vyazkosti past v zavisimosti ot sodержaniya v nikh vody i iskhodnoy vlazhnosti pochvennykh obraztsov* [Change in paste viscosity depending on water content and initial moisture content of soil samples]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 4, pp. 94–103. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-94-103

References

- [1] Shein E.V. *Kurs fiziki pochv* [Course in Soil Physics]. Moscow: Moscow University Press, 2005, 430 p.
- [2] Nikolaeva I.V., Pochatkova T.N., Manucharov A.S. *Vliyanie azotnykh udobreniy i izvestkovaniya na reologicheskie svoystva dernovo-podzolistykh pochv* [Effect of Nitrogen Fertilizers and Liming on the Rheological Properties of Sod-Podzolic Soils]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agrarian University], 2008, no. 2, pp. 31–35.

- [3] Kong L., Kong L.W., Wang M., Guo A.G., Wang Y. Effect of drying environment on engineering properties of an expansive soil and its microstructure. *J. of Mountain Science*, 2017, v. 14, pp. 1194–1201.
- [4] Tang C.S., Cui Y.J., Shi B., Tang A.M., Liu C. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles // *Geoderma*, 2011, v. 166, no. 1, pp. 111–118.
- [5] Tyulin A.F. Organomineral'nye kolloidy v pochve, ikh genesis i znachenie dlya korneвого pitaniya vysshikh rasteniy [Organomineral colloids in soil, their genesis and significance for root nutrition of higher plants]. Moscow: AN SSSR [USSR Academy of Sciences], 1958, 52 p.
- [6] Fedotov G.N., Shein E.V., Ushkova D.A., Salimgareeva O.A., Gorepekin I.V., Potapov D.I. *Nadmolekulyarnye obrazovaniya iz molekul guminovykh veshchestv i ikh fraktal'naya organizatsiya* [Supramolecular formations from humic substance molecules and their fractal organization]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2023, no. 8, pp. 903–910.
- [7] Lehmann P., Leshchinsky B., Gupta S., Mirus B.B., Bickel S., Lu N., Or D. Clays are not created equal: How clay mineral type affects soil parameterization. *Geophysical Research Letters*, 2021, t. 48, no. 20, p. e2021GL095311.
- [8] Cronan C.S., Cronan C.S. Mineral Weathering // *Ecosystem Biogeochemistry: Element Cycling in the Forest Landscape*, 2018, pp. 87–100.
- [9] Di Iorio E., Circelli L., Angelico R., Torrent J., Tan W., Colombo C. Environmental implications of interaction between humic substances and iron oxide nanoparticles: A review // *Chemosphere*, 2022, v. 303, p. 135172.
- [10] Kurochkina G.N. The effect of humic acid adsorption on the coagulation stability of soil suspensions // *Eurasian Soil Science*, 2020, v. 53, pp. 62–72.
- [11] Philippe A., Schaumann G.E. Interactions of dissolved organic matter with natural and engineered inorganic colloids: a review // *Environmental science & technology*, 2014, v. 48, no. 16, pp. 8946–8962.
- [12] Xu Z., Niu Z., Pan D., Zhao X., Wei X., Li X., Wu W. Mechanisms of bentonite colloid aggregation, retention, and release in saturated porous media: role of counter ions and humic acid // *Science of The Total Environment*, 2021, v. 793, p. 148545.
- [13] 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, no. 4, p. 2236.
- [14] Osterberg R., Mortensen K. Fractal dimension of humic acids. A small angle neutron scattering study // *European Biophysics J.*, 1992, v. 21(3), pp. 163–167.
- [15] Wilkinson K.J., Senesi N. *Biophysical Chemistry of Fractal Structures and Processes in Environmental Systems*. John-Wiley & Sons, 2008, 323 p.
- [16] Milanovskiy E.Yu. *Gumusovye veshchestva pochv kak prirodnye gidrofobno-gidrofil'nye soedineniya* [Humic substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds]. Moscow: GEOS, 2009, 186 p.
- [17] Shoba S.A., Potapov D.I., Gorepekin I.V., Ushkova D.A., Gracheva T.A., Fedotov G.N. *Sostoyaniye pochvennykh geley pri raznoy probopodgotovke k viskozimetrii obraztsov dervno-podzolistoy pochvy* [The state of soil gels with different sample preparation for viscometry of sod-podzolic soil samples]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o zhizni* [Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences], 2022, v. 504, pp. 240–244.
- [18] 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, pp. 324–340.
- [19] Estabragh A.R., Parsaei B., Javadi A.A. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil // *Soils and foundations*, 2015, v. 55, no. 2, pp. 304–314.
- [20] Abrukova L.P. *Kinetika protsessov tikotropnogo strukturoobrazovaniya v pochvennykh suspenziyakh* [Kinetics of thixotropic structure formation processes in soil suspensions]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 1970, no. 3, pp. 104–114.
- [21] Gor'kova I.M. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya dispersnykh osadochnykh porod v stroitel'nykh tselyakh* [Physico-chemical studies of dispersed sedimentary rocks for construction purposes]. Moscow: Stroyizdat, 1975, 151 p.
- [22] Manucharov A.S. *K ispol'zovaniyu reologicheskikh issledovaniy v pochvovedenii* [On the use of rheological studies in soil science]. *Vestnik Moskovskogo un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie* [Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science], 1983, no. 3, pp. 40–56.
- [23] Baumgarten W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales. *Habilitation thesis*, Kiel University, 2013, 263 p.
- [24] Lal R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability // *Soil Tillage Res.*, 1993, v. 27, pp. 1–8.
- [25] Khaydapova D.D., Mishchenko A.V., Karpova D.V. *Reologicheskie svoystva pochv kak odna iz kharakteristik fizicheskoy sredy obitaniya rasteniy* [Rheological properties of soils as one of the characteristics of the physical habitat of plants]. *Agrofizika* [Agrophysics], 2022, no. 1, pp. 17–21.
- [26] Chestnova V.V. *Reologicheskie svoystva chernozemov tipichnykh kurskoy oblasti: vzaimosvyaz' s fizicheskimi svoystvami i osnovnoy gidrofizicheskoy kharakteristikoy* [Rheological properties of typical chernozems in the Kursk region: relationship with physical properties and basic hydrophysical characteristics]. *Dis. Cand. Sci. (Biol.)*. Moscow: Moscow State University, 2017, 116 p.
- [27] *Metodicheskoe rukovodstvo po izucheniyu pochvennoy struktury* [Methodological guide to the study of soil structure]. Ed. I.B. Revuta, A.A. Rode. Leningrad: Kolos, 1969, 528 p.
- [28] Frolov Yu.G. *Kurs kolloidnoy khimii* [Colloid chemistry course]. Moscow: Khimiya, 1982, 463 p.
- [29] Kawahigashi M., Sumida H., Yamamoto K. Size and shape of soil humic acids estimated by viscosity and molecular weight // *J. of colloid and interface science*, 2005, v. 284, no. 2, pp. 463–469.
- [30] Umarova A.B., Butylkina M.A., Suslenkova M.M., Aleksandrova M.S., Ezhelev Z.S., Khmeleva M.V., Shkhatpatsev A.K., Gasina A.I. *Agregatnaya struktura estestvennykh i pakhotnykh pochv raznogo genezisa: morfologicheskie i reologicheskie kharakteristiki* [Aggregate structure of natural and arable soils of different genesis: morphological and rheological characteristics]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2021, v. 55, no. 9, pp. 1019–1032.

- [31] Galicia-Andrés E., Oostenbrink C., Gerzabek M.H., Tunega D. On the adsorption mechanism of humic substances on kaolinite and their microscopic structure // *Minerals*, 2021, v. 11, no. 10, p. 1138.
- [32] Fedotov G.N., Shoba S.A., Ushkova D.A., Gorepekin I.V., Sukharev A.I., Potapov D.I. Three-Phase and Gel Models of Soils in the Analysis of Experimental Results // *Doklady Earth Sciences*, 2024, v. 515, pp. 453–457.
- [33] Linkevich E.V., Yudina N.V., Savel'eva A.V. *Formirovanie guminovykh kolloidov v zavisimosti ot rN sredy vodnykh rastvorov* [Formation of humic colloids depending on the pH of aqueous solutions]. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [J. of Physical Chemistry], 2020, v. 94, no. 4, pp. 568–573.
- [34] Tarasevich Yu.I., Dolenko S.A., Trifonova M.Yu., Alekseenko E.Yu. *Assotsiatsiya i kolloidno-khimicheskie svoystva guminovykh kislot v vodnykh rastvorakh* [Association and colloid-chemical properties of humic acids in aqueous solutions]. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid Journal], 2013, v. 75, no. 2, pp. 230–236.
- [35] Fasurová N., Cechlovská H., Kucerik J. A comparative study of South Moravian lignite and standard IHSS humic acids, optical and colloidal properties // *Petroleum & coal*, 2006, v. 48, no. 2, pp. 24–32.
- [36] Volkova N.N., Dzhardimalieva G.I., Krisyuk B.E., Chukanov N.V., Shershnev V.A., Shilov G.V. *Mekhanokhimicheskoe razrushenie kristallogidratov atsetilendikarboksilatov kobal'ta i tsinka pri dehidratatsii* [Mechanochemical destruction of crystalline hydrates of cobalt and zinc acetylenedicarboxylates during dehydration]. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences. Chemical Series], 2016, no. 8, pp. 2025–2033.
- [37] Miftakhova N.Sh., Petrova T.P., Rakhmatullina I.F. *Kristally. Kristallogidraty* [Crystals. Crystal hydrates]. Kazan: Kazan State Technological University, 2006, 24 p.
- [38] Spetsov E.A., Aleksandrova Yu.V., Mal'tseva N.V., Vlasov E.A. *Issledovanie vliyaniya mekhanokhimicheskogo aktivirovaniya na svoystva gibbsita* [Study of the influence of mechanochemical activation on the properties of gibbsite]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2013, no. 18 (44), pp. 008–010.
- [39] Chen X., Wu Q., Gao J., Tang Y. Hydration characteristics and mechanism analysis of β -calcium sulfate hemihydrate // *Construction and Building Materials*, 2021, v. 296, p. 123714.

The work was carried out within the framework of the RNF project No. 22-14-00107.

Authors' information

Fedotov Gennadiy Nikolaevich✉ — Dr. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, gennadiy.fedotov@gmail.com

Tarasenko Dar'ya Aleksandrovna — Engineer of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, ushkova_dasha@mail.ru

Gorepekin Ivan Vladimirovich — Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Eurasian Center for Food Security of Lomonosov Moscow State University, Researcher of the Faculty of Soil Science of Lomonosov Moscow State University, decembrist96@yandex.ru

Batyrev Yuriy Pavlovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@bmstu.ru

Received 17.10.2024.

Approved after review 21.11.2024.

Accepted for publication 26.05.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest