

УДК 634.4

ВЯЗКОУПРУГОЕ ПОВЕДЕНИЕ ВЕРТИКОВОГО СОЛОНЦА КАМЕННОЙ СТЕПИ

© 2019 г. Н. Б. Хитров¹, *, Д. Д. Хайдапова²¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

*e-mail: khitrovnb@gmail.com

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

После доработки 14.12.2018 г.

Принята к публикации 26.12.2018 г.

Цель работы — определить характеристики вязкоупругого поведения паст и монолитных образцов солонцовых и вертикальных горизонтов единого почвенного профиля Vertic Solonetz из Каменной Степи (Россия, Воронежская обл.) и на этой основе объяснить возникновение трех уровней несогласованных друг с другом деформационных структур с разной длиной волны и разным характером проявления деформации почвенной массы. Реологические характеристики для шести горизонтов получены методом амплитудной развертки (amplitude sweep test — AST) на реометре MCR-302. Обсуждаются особенности общего характера вязкоупругого поведения паст и монолитов, связь между модулем запаса G'_{LVR} в линейном диапазоне вязкоупругости с влажностью паст и микромонолитов, распределение реологических характеристик по профилю почвы, связь интеграла I_z , по величине которого оценивают жесткость структуры, с содержанием обменного натрия. Представлено сравнение реологических характеристик Vertic Solonetz с литературными данными по Vertisols из Бразилии, России и США и засоленной аллювиальной глинистой почвой Испании. Предложена гипотеза формирования почвенного профиля Vertic Solonetz с микрорельефом гильгай. Она основана на реологических характеристиках вязкоупругого поведения исследованных горизонтов.

Ключевые слова: реологические характеристики, линейный диапазон вязкоупругости, модуль запаса, модуль потерь, сликенсайды

DOI: 10.1134/S0032180X19070050

ВВЕДЕНИЕ

Темные слитые почвы (Vertisols по WRB-2015 [21]) и солонцы — две группы почв, формирование которых во многом связано с особым физическим состоянием, сильно изменяющимся в зависимости от влажности. Солонцовый горизонт (гор. natric по WRB-2015) солонцов и все горизонты Vertisols имеют высокую плотность и твердость в сухом состоянии и становятся липкими и вязкими с потерей ими несущей способности при сильном увлажнении. Такое изменение физического состояния этих почв создавало прецеденты классификационного их смешивания. Многие глинистые набухающие почвы Австралии, Африки, Америки, содержащие заметное количество обменного натрия и образующие сеть трещин на поверхности при высыхании, относили к солонцам (Solodized Solonetz) до середины 1960-х гг. [16, 31, 34, 35], позднее по Soil Taxonomy [33] их стали называть Vertisols. Аналогичная ситуация была в нашей стране. Это стало ясно по результатам целенаправленного поиска глинистых набухающих почв, имеющих поверхности скольжения (сли-

кенсайды), на территории Восточно-Европейской равнины. Более трети выявленных ареалов таких почв ранее считались солонцами на глинах [9].

Вместе с тем, существует особая промежуточная группа почв, которая совмещает глинистый солонцовый горизонт в верхней части и слитой (вертикальный) горизонт в средней и нижней частях единого почвенного профиля. В первых двух версиях WRB [20] подобные объекты идентифицировали как Sodic Vertisols в связи с тем, что реферативная почвенная группа (РПГ) Vertisols в диагностическом ключе располагалась раньше РПГ Solonetz. После изменения порядка диагностики РПГ в третьей версии WRB (2015) — РПГ Solonetz проверяется раньше, чем РПГ Vertisols — подобные почвы приобрели более четкое классификационное положение, отражающее строение их почвенного профиля — Vertic Solonetz. В классификации почв России [5] и “Полевом определителе почв России” [8], являющемся более поздней ее версией, почвы, имеющие солонцовый гор. ASN или BSN и слитой (вертикальный) гор. V, относят к солонцам слитизированным.

При походе, на первый взгляд, изменении физического состояния солонцовых и вертикальных горизонтов в зависимости от степени увлажнения, упоминаемом выше, эти горизонты имеют существенные различия морфологического строения, причин и процессов их формирования. В связи с этим, для их сравнения целесообразно использовать методы оценки структурного состояния почвы. Среди последних важное место занимают методы изучения реологического поведения почв под нагрузкой, на основе которых получают количественные параметры для описания взаимодействия между частицами почвы и деформации структуры почвы [7, 22–25].

Большинство реологических исследований почв выполнено на растертых образцах в состоянии паст с высокой влажностью или суспензий. Во второй половине XX в. использовали преимущественно ротационные вискозиметры, в которых образец подвергался деформации под нагрузкой в зазоре между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами [1]. Реологические свойства глинистых набухающих почв, полученные с помощью ротационного вискозиметра РВ-8, были представлены только в одной статье [2]. Были исследованы два разреза слитых черноземов Краснодарского края и один разрез смолницы из Болгарии. Реологические свойства этих почв были близки. В густых суспензиях с двумя уровнями увлажнения, соответствовавших влажности верхнего предела пластичности и влажности максимального набухания, почвы демонстрировали тиксотропные коагуляционные структуры, прочность которых при деформировании понижалась с увеличением способности к разжижению [2].

В последние десятилетия появился метод амплитудной развертки, позволяющий оценивать вязкоупругое поведение (viscoelastic behaviour) дисперсных систем, включая почвы [15, 24, 25]. Его реализуют с помощью модульных реометров. Образец, расположенный между двумя параллельными пластинами, подвергается задаваемой сдвиговой деформации в колебательном режиме с увеличивающейся амплитудой, и на каждом шаге производится измерение напряжения сдвига [30]. На основе этого метода в литературе обсуждают характер связей между частицами почвы и оценивают изменение реологических характеристик под влиянием содержания и состава гумуса [27], гранулометрического состава [13, 25], минералогического состава ила [25], влажности или давления почвенной влаги [18, 19, 26, 32], концентрации солей в растворе и содержания обменных катионов [14, 19, 25, 26]. Одним из преимуществ использования колебательных методов на реометре MCR-302 является возможность подвергать испытаниям образцы почв ненарушенного сложения (монолиты) [6].

В четырех статьях представлены реологические характеристики Vertisols из Бразилии, США и России [4, 17, 25, 32].

Цель – определить характеристики вязкоупругого поведения паст и монолитных образцов солонцовых и вертикальных горизонтов единого почвенного профиля Vertic Solonetz и на этой основе объяснить возникновение трех уровней несогласованных друг с другом деформационных структур с разной длиной волны и разным характером проявления деформации почвенной массы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования реологического поведения являются монолитные и нарушенные образцы горизонтов солонца темного квазиглеевого слитизированного солончакового сульфатно-содового натриевого срединно-карбонатного коркового глинистого на четвертичных лёссовидных глинах. По международной классификации почв WRB-2015 [21] – Nudintric Vertic Stagnic Protosalic Solonetz (Clayic, Columnic, Cutanic, Humic, Hypernatric). Разрез V-920 заложен в центре почвенного ареала, имеющего общую площадь 0.87 га. Этот ареал расположен на северных отрогах Калачской возвышенности в Каменной Степи (Воронежская обл., Таловский р-н), в середине общего длинного пологого склона западной экспозиции в сторону долины р. Чигла, расчлененного ложбинами, переходящими в балки, на слабоклонной террасовидной поверхности, примыкающей к левому борту одной из широких ложин.

Почвенный профиль включает три уровня несогласованных друг с другом деформационных структур с разной длиной волны, разным характером проявления деформации почвенной массы и отличающимся влиянием на двумерное пространственное распределение химических и физических свойств [12]. Верхний уровень деформационных структур представляет собой смятый горизонтально в складки солонцовый горизонт ASN, поверхность которого формирует микро рельеф гильгай с длиной волны 0.7–1.1 м и амплитудой 15–20 см. Средний уровень деформационных структур на глубине 40–70 см с длиной волны 0.4–0.7 м выражен морфологически в виде чередования темно-серых чаше- и воронкообразных морфонов гор. AU_b,sn,q,ca,v и оливково-бурых выпуклых кверху морфонов гор. Q1_v,ca,nc. Нижний уровень неконтрастных по цвету чаше- и диапироподобных объемных тел вертикального квазиглеевого горизонта V/Qca,nc на глубине 70–130 см с длиной волны около 1.5 м образован крупными поверхностями скольжения. Более подробное описание и двумерное распределение свойств представлено в [12].

Реологические характеристики определяли на реометре MCR-302 (Anton Paar, Austria). Испытания методом амплитудной развертки (amplitude sweep tests – AST) проводили в колебательном режиме с увеличивающейся амплитудой задаваемой сдвиговой деформации (shear strain – γ) и измеряемого напряжения сдвига (shear stress – τ) при следующих технических условиях: диаметр вращающейся верхней пластины – 2.5 см; задаваемая сдвиговая деформация $\gamma = 0.001–100\%$; угловая частота $f = 0.5$ Гц; число измеряемых точек – 30; температура образца поддерживалась постоянной 20°C интегрированным элементом Пельтье; зазор между пластинами 4 ± 0.2 мм для растертых образцов и 6 ± 0.2 мм для монолитов; контролируемая нормальная нагрузка < 15 Н.

Обратим внимание, что в большинстве работ, в которых используется метод AST, жестко фиксируется величина зазора между пластинами [17, 25, 32]. Это требование объясняют тем, что деформацию образца рассчитывают по отклонению размера образца, отнесенному к величине зазора [17]. Для соблюдения такого требования испытуемый образец перед загрузкой в прибор делают толще и далее частично расплющивают его между пластинами до фиксированной величины зазора. В частности в [17] образец перед загрузкой вырезался до толщины 4.5 мм при последующей съемке с зазором точно 4 мм, иными словами, образец перед измерением подвергался деформации по вертикали на 11%.

В нашей работе величина зазора между пластинами жестко не фиксировалась, задавалась контролируемая нормальная нагрузка, которая обеспечивала необходимое сцепление пластин с образцом, минимально влияя на его структуру. По мнению Мезгера [30], при небольших отклонениях (деформациях) малое варьирование величины зазора между пластинами будет давать сопоставимые значения реологических характеристик.

Образцы нарушенного строения предварительно были высушены, растерты резиновым пестиком и просеяны через сито 1 мм. Перед испытаниями их засыпали в цилиндрические формы с внутренним диаметром 2.5 см и капиллярно насыщали водой в течение 1 сут. Подготовленный образец выталкивали из цилиндра поршнем непосредственно на рабочую поверхность прибора. Повторность трехкратная. Еще три повторности после указанной процедуры за 1 ч перед началом испытания снимали с платформы капиллярного насыщения и переставляли на сухую фильтровальную бумагу для удаления части впитавшейся воды и получения более низкой влажности образца.

Монолитные образцы отбирали из почвы с высокой влажностью, исключая наличие открытых трещин, с помощью режущих полых цилиндров объемом 212 см^3 . Образцы паковали в

контейнеры для исключения их деформирования при транспортировке и хранили в холодильнике до испытаний. Перед реологическими испытаниями монолиты ставили дополнительно на капиллярное насыщение в течение трех суток. Для испытаний использовали сторону, через которую проходило капиллярное насыщение. Из сравнительно большого монолита металлическим полым цилиндром высотой 6 мм и диаметром 2.5 см вырезали от 4 до 6 микромонолитов, каждый из которых по очереди помещали в рабочую область реометра для проведения испытания, выталкивая микромонолит из цилиндра поршнем. Более тонкие (4 мм) микромонолиты вырезать не удалось.

Программное обеспечение реометра MCR-302 с помощью специального математического преобразования раскладывает комплексный модуль G^* (complex modulus) на две составляющие: G' – модуль запаса (storage modulus), и G'' – модуль потерь (loss modulus). Модуль запаса G' характеризует упругую составляющую вязкоупругого поведения образца. Его название “storage modulus G' ” означает, что энергия напряжения временно накапливается в ходе испытания, но она может быть возвращена после его окончания. Модуль потерь G'' характеризует вязкую составляющую вязкоупругого поведения образца. Его название “loss modulus G'' ” намекает, что энергия, использованная на инициацию течения, необратимо теряется (диссипирует), трансформируясь в тепло сдвига [30].

На основе экспериментальных кривых изменения напряжения сдвига, модулей G' и G'' от задаваемой деформации определяют параметры линейного диапазона вязкоупругого поведения (linear viscoelastic range, LVR), точки равных значений G' и G'' (Crossover), точки максимального значения G'' в интервале деформации от конца LVR до Crossover и интеграл z (I_z).

Деформацию конца LVR определяли по точке пересечения горизонтальной линии, соответствующей среднему арифметическому величин G' ряда начальных точек, с линией $G' = f(\gamma)$ на участке начала постоянного уменьшения G' (то есть при $\Delta G'/\Delta \gamma < 0$). При этом значение среднего арифметического G' принимали за модуль запаса G'_{LVR} в области линейного диапазона вязкоупругого поведения. По указанному ряду рассчитывали стандартное отклонение G'_{LVR} для индивидуального образца. По пересечению кривой $G'' = f(\gamma)$ с вертикальной линией, соответствующей деформации конца LVR, определяли модуль потерь G''_{LVR} в области линейного диапазона вязкоупругого поведения. Для конца LVR рассчитывали тангенс угла смещения фаз $\text{tg} \delta^1 = G''/G'$ и соответствующую

¹ В англоязычной литературе часто используют другое сокращение для тангенса угла $\delta - \tan \delta$.

щий ему угол δ . Этот показатель характеризует соотношение вязкой и упругой составляющих вязкоупругого поведения образца.

Для всех отмеченных выше значений деформации определяли соответствующие им напряжения сдвига.

В каждом образце после проведения реологического испытания определяли влажность весовым способом, высушивая образец при 105°C .

В серии повторностей каждого образца для каждого параметра оценивали соответствие нормальному распределению по критерию Уилка-Шапиро, рассчитывали минимум, медиану, максимум, среднее арифметическое, стандартное отклонение, коэффициент вариации. Сравнение каждого показателя в разных горизонтах почвенного профиля выполняли путем оценки значимости различий дисперсий по критерию Фишера и средних по критерию Стьюдента [3]. Аналогично оценивали значимость разницы влажности и реологических показателей для образцов нарушенного сложения с отличающимся исходным увлажнением образцов. При наличии значимой разницы показателя рассчитывали параметры линейной регрессии связи показателя с влажностью. Все расчеты выполнены в Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реологические свойства почвенных паст. Образцы Vertic Solonetz имеют общий характер вязкоупругого поведения паст при двух уровнях увлажнения. Выделяются три основные стадии изменения реологических показателей при увеличении задаваемой деформации образца (рис. 1). Первая стадия – преимущественно упругое поведение, характеризующееся линейным диапазоном вязкоупругости (LVR), в пределах которого на фоне возрастающей деформации увеличивается напряжение сдвига при малом варьировании модулей запаса G' и потерь G'' . Вторая стадия – состояние перехода к пластическому изменению образца, сопровождающееся замедлением увеличения напряжения сдвига с увеличением деформации при условии превалирования упругой составляющей над вязкой, то есть $G' > G''$, на фоне уменьшения комплексного модуля G^* . В англоязычной литературе эта стадия называется по-разному: “stage of transgression” [22, 25]; “transition” или “pre-yielding” (пред-текучесть) [27]; “yield zone” или “yield/flow transition range” [30, с. 152]. В исследованных образцах Vertic Solonetz эта стадия может быть разделена на два этапа, на первом из которых уменьшение модуля запаса G' сопровождается последним некоторого максимума, а на втором этапе оба модуля G' и G'' уменьшаются. Вторая стадия в целом завершается в точке Crossover, ко-

гда достигается равенство $G' = G''$. Третья стадия – вязкое течение образца, при котором $G'' > G'$.

Влажность почвенных паст из растертых образцов разных горизонтов солонца слитизированного после капиллярного увлажнения в течение 1 сут изменялась от 70 до 100 мас. % (рис. 2, А). Размах диапазона значений влажности в разных повторностях для одного горизонта составлял от 2 до 9 мас. %. Наименьшая влажность была в самом нижнем гор. V/Q2ca,nc на глубине 97–101 см. Она значимо отличалась от влажности всех остальных выше лежащих горизонтов. Самая высокая влажность была в средней части профиля в гор. AUb,sn,q,v и V/Q1ca,nc. Солонцовый гор. ASN имел промежуточный диапазон влажности капиллярного увлажнения, значимо отличавшийся от такового всех ниже лежащих горизонтов, имеющих сликенсайды.

После принудительного оттока части воды в течение 1 ч из капиллярно насыщенной пасты на сухой бумажный фильтр, влажность паст значимо уменьшилась на 4–12 мас. %. При этом соотношение влажности в разных горизонтах профиля осталось почти таким же, как при капиллярном увлажнении (рис. 2, А).

Модуль запаса G'_{LVR} , характеризующий упругую составляющую в линейном диапазоне вязкоупругого поведения паст, при капиллярном увлажнении изменялся от 6.4×10^4 Па в верхней части солонцового гор. ASN1 до 9.2×10^4 – 12.3×10^4 Па во всех остальных горизонтах (рис. 2, Б). Размах диапазона значений в повторностях для отдельных горизонтов был относительно небольшой.

При более низкой влажности пасты модуль запаса G'_{LVR} увеличился, составив от 2.1×10^5 до 3.8×10^5 Па с тенденцией относительно более сильного увеличения в нижних горизонтах V/Q1ca,nc и V/Q2ca,nc, имеющих крупные сликенсайды, по сравнению с поверхностным солонцовым гор. ASN. Вместе с тем, пасты из гор. ASN имели очень широкий диапазон варьирования рассматриваемого показателя, не позволивший получить значимые различия между горизонтами.

Модуль потерь G''_{LVR} , характеризующий вязкую составляющую линейного диапазона вязкоупругого поведения, изменялся от 0.9×10^4 до 1.5×10^4 Па при капиллярном увлажнении и от 2.3×10^4 до 3.8×10^4 Па при более низкой влажности (рис. 2, В).

Величина деформации образца в диапазоне линейной вязкоупругости имела наибольшие значения 0.10–0.13% в гор. V/Q1ca,nc на глубине 70–74 см, уменьшаясь до 0.03–0.05% как в более глубоком гор. V/Q2ca,nc, так и в менее глубоких почвенных горизонтах (рис. 2, Г). Значения этого

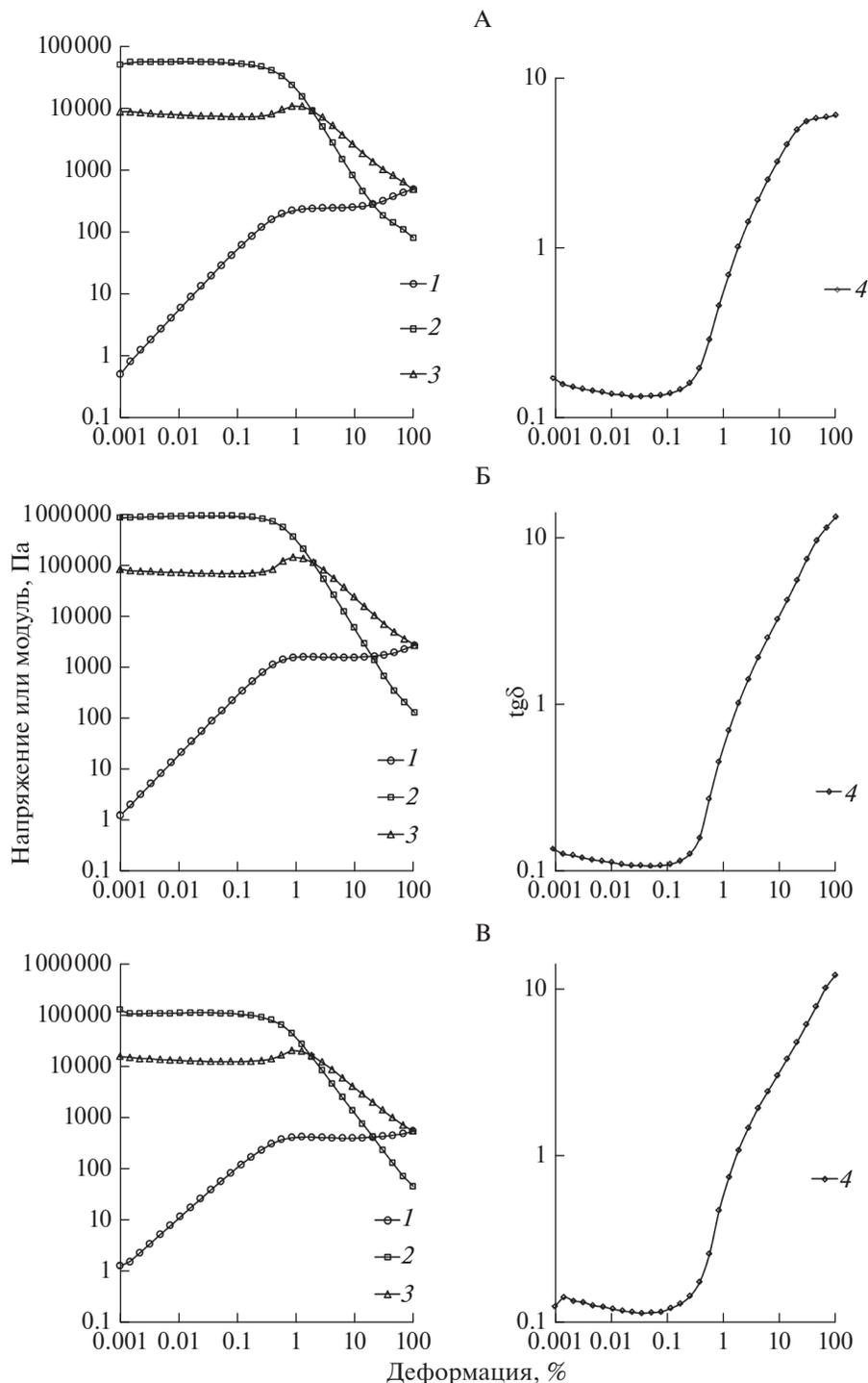


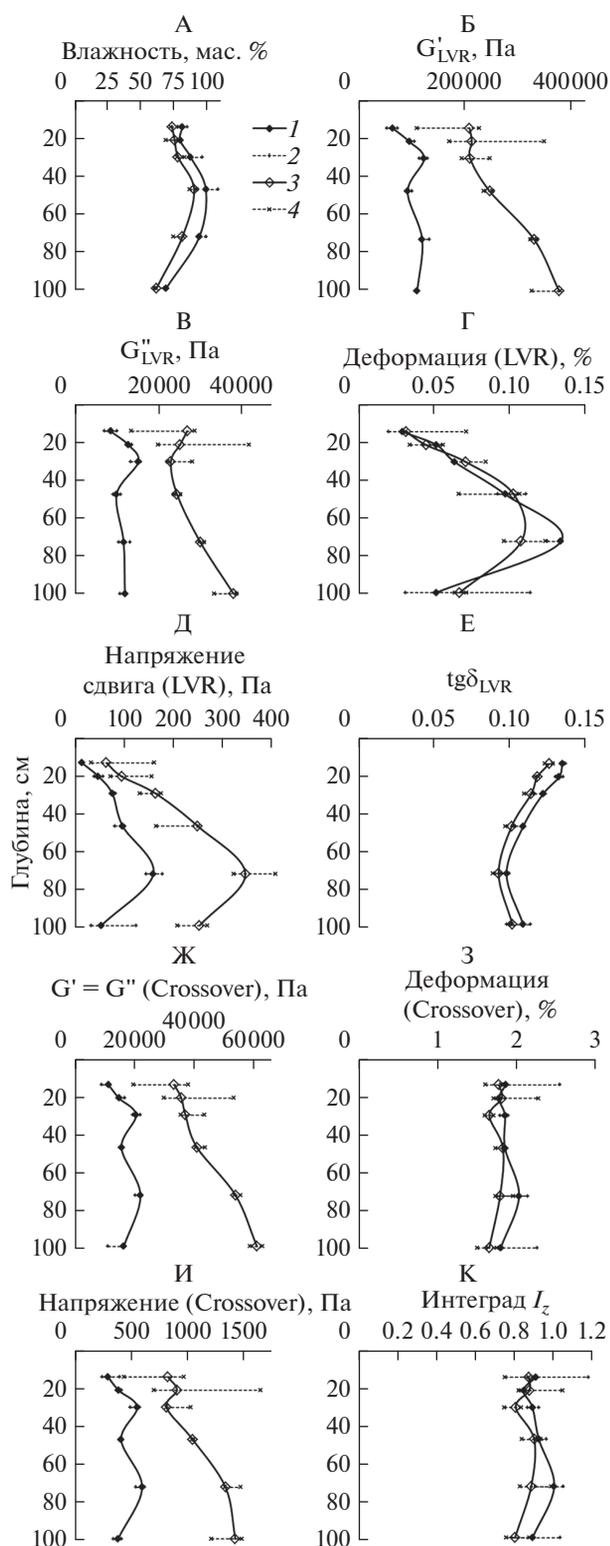
Рис. 1. Выборочные примеры изменения напряжения сдвига (1), модуля запаса G' (2), модуля потерь G'' (3) и $\text{tg } \delta$ (4) с увеличением деформации образцов капиллярно насыщенных паст. Горизонт и глубина: А – ASN1, 12–16 см; Б – AUb,q,sn,v, 45–49 см; В – V/Q2ca,nc, 97–101 см.

показателя в пастах с разной влажностью значительно не различались для отдельных горизонтов.

Напряжение сдвига в конце диапазона линейной вязкоупругости также было максимальным в гор. V/Q1ca,nc (рис. 2, Д), уменьшаясь и вверх, и вниз по профилю. При капиллярном увлажне-

нии оно изменялось от 16 до 160 Па. При более низкой влажности его значения увеличились в 2–4 раза, сохранив общий характер распределения по профилю.

Тангенс угла смещения фаз $\text{tg } \delta = G''/G'$ в конце LVR имел более высокие значения в солонцо-



вом гор. ASN: 0.122–0.135 при капиллярном увлажнении и 0.114–0.126 при более низкой влажности, которые значимо отличались от более низких значений в горизонтах со сликенсайда-

Рис. 2. Профильное распределение средних значений (1, 3) и пределов (минимум–максимум) варьирования в повторностях (2, 4) реологических показателей Vertic Solonetz в пастах после капиллярного увлажнения (1, 2) и после капиллярного увлажнения с частичным оттоком влаги (3, 4): А – влажность; Б – модуль запаса G'_{LVR} ; В – модуль потерь G''_{LVR} ; Г – деформация (LVR); Д – напряжение сдвига (LVR); Е – $\text{tg}\delta = G''/G'$ (LVR); Ж – $G' = G''$ (Crossover); З – деформация (Crossover); И – напряжение сдвига (Crossover); К – интеграл I_z .

ми: 0.098–0.109 и 0.093–0.102, соответственно (рис. 2, Е).

Максимум G'' в интервале от конца LVR до точки Crossover изменяется в интервале 1.05×10^4 – 2.74×10^4 Па при капиллярном увлажнении пасты и 2.39×10^4 – 8.18×10^4 Па после частичного дренажа капиллярно насыщенной пасты. Это состояние возникает при одинаковой деформации 0.85–1.27% при обоих уровнях увлажнения. Наименьшие значения максимума G'' наблюдались в солонцовом горизонте ASN1.

Значения модулей запаса G' и потерь G'' в точке их равенства (Crossover) при капиллярном увлажнении были минимальными в солонцовом гор. ASN 1.1×10^4 Па и значимо увеличивались в ниже лежащих горизонтах 1.5×10^4 – 2.2×10^4 Па (рис. 2, Ж). При более низкой влажности этот контраст только усилился: с 1.9×10^4 Па в гор. ASN до 3.6×10^4 – 5.9×10^4 Па в горизонтах со сликенсайдами.

Деформация, при которой достигалось равенство $G' = G''$, незначимо изменялась по профилю в интервале 1.66–2.03% при обоих уровнях увлажнения (рис. 2, З), а характер профильного распределения напряжений в пастах был похож на таковой для значений модулей G' и G'' .

Напряжение сдвига в точке Crossover варьировало по профилю в пределах 250–550 Па при капиллярном насыщении и увеличивалось вниз по профилю с 750 до 1400 Па после частичного дренажа пасты (рис. 2, И).

Интеграл I_z , характеризующий структурную жесткость, в пастах имел незначимо отличающиеся значения от 0.8 до 1.1 (безразмерный) во всех горизонтах при двух уровнях увлажнения (рис. 2, К).

Реологические свойства монолитных образцов почв. Общий характер изменения кривых G' , G'' и τ в зависимости от деформации для образцов микромонолитов Vertic Solonetz был принципиально таким же, как для паст.

Влажность монолитов, исходно влажных и дополнительно капиллярно увлажненных в течение трех суток, изменялась от 36.0 в гор. V/Q2са,nc до 48.1–53.5 мас. % в остальных вышележащих гори-

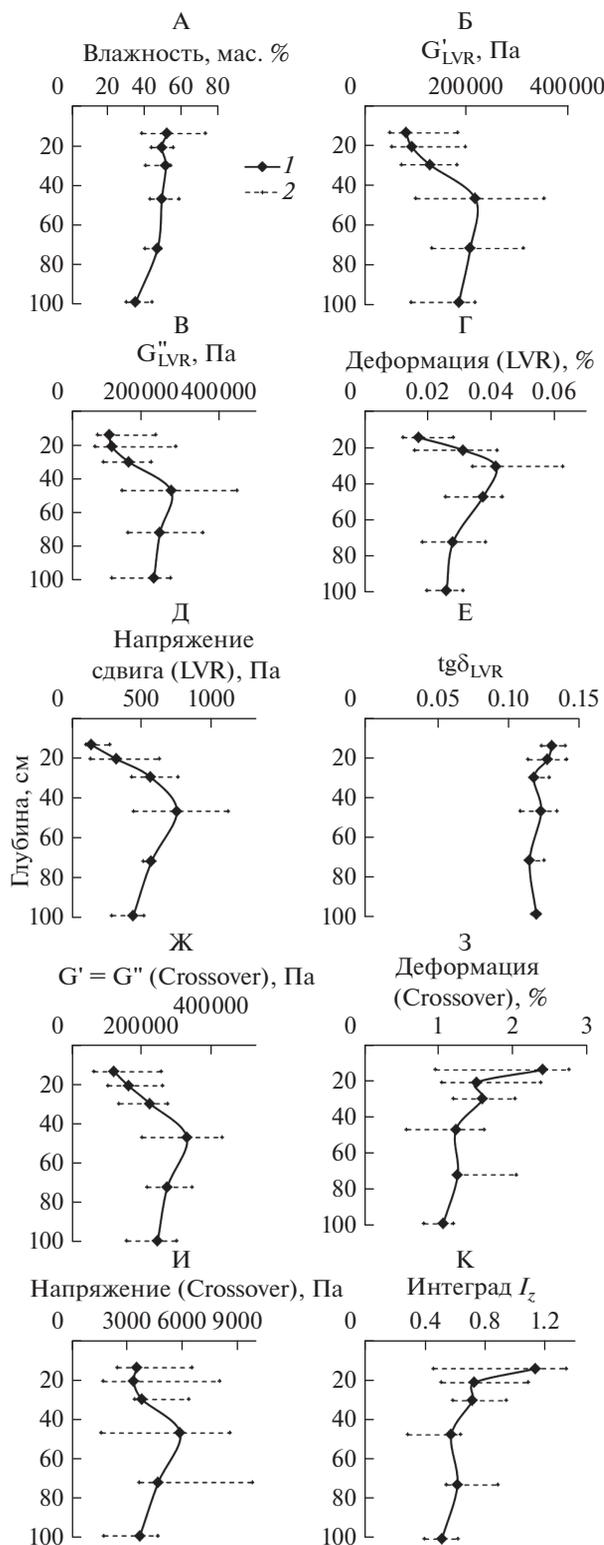
Рис. 3. Профильное распределение медианы (1) и пределов (минимум–максимум) варьирования в повторностях (2) реологических показателей Vertic Solonetz в исходно влажных монолитах после дополнительного капиллярного увлажнения: А – влажность; Б – модуль запаса G'_{LVR} ; В – модуль потерь G''_{LVR} ; Г – деформация (LVR); Д – напряжение сдвига (LVR); Е – $\text{tg} \delta = G''/G'$ (LVR); Ж – $G' = G''$ (Crossover); З – деформация (Crossover); И – напряжение сдвига (Crossover); К – интеграл I_z .

зонтах, с размахом варьирования в повторениях из одного горизонта 9–16 мас. %, исключая гор. ASN1, в котором размах варьирования составил 35 мас. % (рис. 3, А). Обратим внимание, что гор. V/Q2ca,nc в момент отбора монолитов и определения плотности был ниже уровня грунтовой воды, которую специально откачивали для выполнения измерений. Плотность горизонта составляла $1.45 \pm 0.01 \text{ г/см}^3$ (без учета содержания воды) при влажности $31.0 \pm 0.4 \text{ мас. \%}$. Вверх по профилю плотность почв (и взятых монолитов) последовательно уменьшалась с 1.36 до 1.19 г/см^3 при естественной влажности в интервале 35–43 мас. %.

Модуль запаса G'_{LVR} имел более низкие значения $0.8 \times 10^6 - 1.0 \times 10^6 \text{ Па}$ в солонцовом горизонте возле поверхности почвы и более высокие значения $2.0 \times 10^6 - 2.3 \times 10^6 \text{ Па}$ в горизонтах со сликенсайдами в средней и нижней частях профиля почвы (рис. 3, Б). Такой же характер изменения по профилю отмечен для модуля потерь G''_{LVR} : от $1.0 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5 \text{ Па}$ вверху до $1.5 \times 10^5 - 2.7 \times 10^5 \text{ Па}$ внизу (рис. 3, В). Тангенс угла смещения фаз $\text{tg} \delta_{LVR}$, наоборот, уменьшался сверху вниз с 0.131 до 0.115 (рис. 3, Е). Линейный диапазон вязкоупругости сохранялся до деформации образца 0.04% при напряжениях сдвига от 100 до 700 Па (рис. 3, Г, Д).

Равенство модулей $G' = G''$ (Crossover), после которого образец переходит из пластичного в вязкотекучее состояние, наблюдалось при деформации от 1.1–1.5% в нижних горизонтах до 2.5% в гор. ASN и напряжениях сдвига от 3×10^3 до $6 \times 10^3 \text{ Па}$ по всему профилю (рис. 3, Ж–И).

Интеграл I_z имел более высокие значения 1.2 в солонцовом гор. ASN и более низкие значения 0.5–0.7 в горизонтах средней и нижней частей профиля, в которых развиты сликенсайды (рис. 3, К).



ОБСУЖДЕНИЕ

Общий характер вязкоупругого поведения паст и микромонолитов. Особенностью всех исследованных образцов Vertic Solonetz является наличие максимума на кривой изменения модуля по-

терь G'' при возрастающей деформации. Максимум G'' возникает в переходном состоянии между концом LVR и точкой Crossover. Подобный эффект известен [22, 27, 30].

Таблица 1. Параметры линейной регрессии $Y = a + bW$, аппроксимирующей связь реологических характеристик (Y) с влажностью (W , мас. %) почвенных паст. Все параметры регрессии и сами регрессии значимы при $p = 0.95$, $n = 6$

Горизонт	Глубина, см	Y, единицы	параметр ± ошибка		R ²
			a	b	
ASN1	12–16	G' _{LVR} , кПа	1364 ± 159	–15.59 ± 2.00	0.938
ASN1	19–23	G' _{LVR} , кПа	1853 ± 375	–21.6 ± 4.82	0.834
AUb,sn,q	28–32	G' _{LVR} , кПа	741 ± 174	–6.65 ± 2.02	0.730
AUb,sn,q,v	45–49	G' _{LVR} , кПа	1055 ± 267	–9.16 ± 2.76	0.734
V/Q1ca,nc	70–74	G' _{LVR} , кПа	1216 ± 183	–11.19 ± 2.06	0.881
V/Q2ca,nc	97–101	G' _{LVR} , кПа	2329 ± 256	–31.67 ± 3.86	0.944
ASN1	12–16	τ _{LVR} , Па	841 ± 277	–9.91 ± 3.48	0.670
ASN1	19–23	τ _{LVR} , Па	728 ± 227	–8.34 ± 2.91	0.673
AUb,sn,q	28–32	τ _{LVR} , Па	623 ± 123	–5.88 ± 1.43	0.808
AUb,sn,q,v	45–49	τ _{LVR} , Па	837 ± 344	–7.02 ± 3.55	0.494
V/Q1ca,nc	70–74	τ _{LVR} , Па	1200 ± 229	–10.63 ± 2.58	0.810
V/Q2ca,nc	97–101	τ _{LVR} , Па	1576 ± 330	–21.45 ± 4.98	0.822

В образцах Vertic Solonetz величина максимума G'' превышает G''_{LVR} в 1.4–2.4 раза и G''_{Crossover} в 1.16–1.28 раза и наблюдается в сравнительно узком диапазоне деформации образцов 0.87–1.27% в пастах и 0.38–1.27% в микромонолитах.

В руководстве по реологии [30] в качестве примера указано, что подобный пик G'' возникает во многих гелях и высококонцентрированных дисперсиях, имеющих сетку физических и химических связей между молекулами полимеров и твердыми частицами. После окончания LVR сетка структурных связей в образце начинает необратимо деформироваться, но ее коллапс наступает не сразу. Модуль G'' представляет потерю (диссипацию) энергии деформации, обусловленную процессами внутреннего трения [30]. Временное увеличение G'' можно объяснить разрушением некоторых микроагрегатов с образованием большего числа мелких частиц. После того, как заканчивается ресурс для реализации такого процесса, возрастающие напряжения сдвига и деформация приводят к постепенному необратимому нарушению связей между частицами и полному коллапсу структуры, проявляющемуся в вязком течении образца после точки Crossover.

Влияние влажности паст. Среди измеренных и рассчитанных реологических показателей значимое влияние влажности паст было установлено для модуля запаса G'_{LVR}, связанных с ним очень тесной

корреляционной связью (R² = 0.974–0.998) модуля потерь G''_{LVR} и значений модулей в точке их равенства (Crossover), а также напряжения сдвига в конце диапазона LVR и в точке Crossover. Параметры уравнений линейной регрессии для G'_{LVR} и напряжения сдвига в конце LVR представлены в табл. 1.

В исследованном диапазоне сравнительно высокой влажности почвенных паст значения разных модулей (G'_{LVR}, G''_{LVR}, G'_{Crossover}) и напряжения сдвига (τ_{LVR}, τ_{Crossover}) увеличиваются при уменьшении влажности. На это указывает отрицательный знак наклона (коэффициент b) линейной регрессии. Согласно имеющимся представлениям [15], такое изменение реологических характеристик при уменьшении влажности или при более отрицательных значениях матричного потенциала обусловлено возрастанием сил адгезии и когезии между частицами почвы, что сопровождается более ярким проявлением упругого поведения пасты. Аналогичные изменения реологических характеристик отмечены и в Vertisols [32], и в других почвах [18, 19, 26, 32].

По характеру изменения реологических характеристик от влажности, профиль исследованного Vertic Solonetz может быть разделен на четыре слоя: (1) обе исследованные глубины солонцового гор. ASN1; (2) отдельно солонцеватый гор. AUb,q,sn; (3) совместно гор. AUb,q,sn,v и

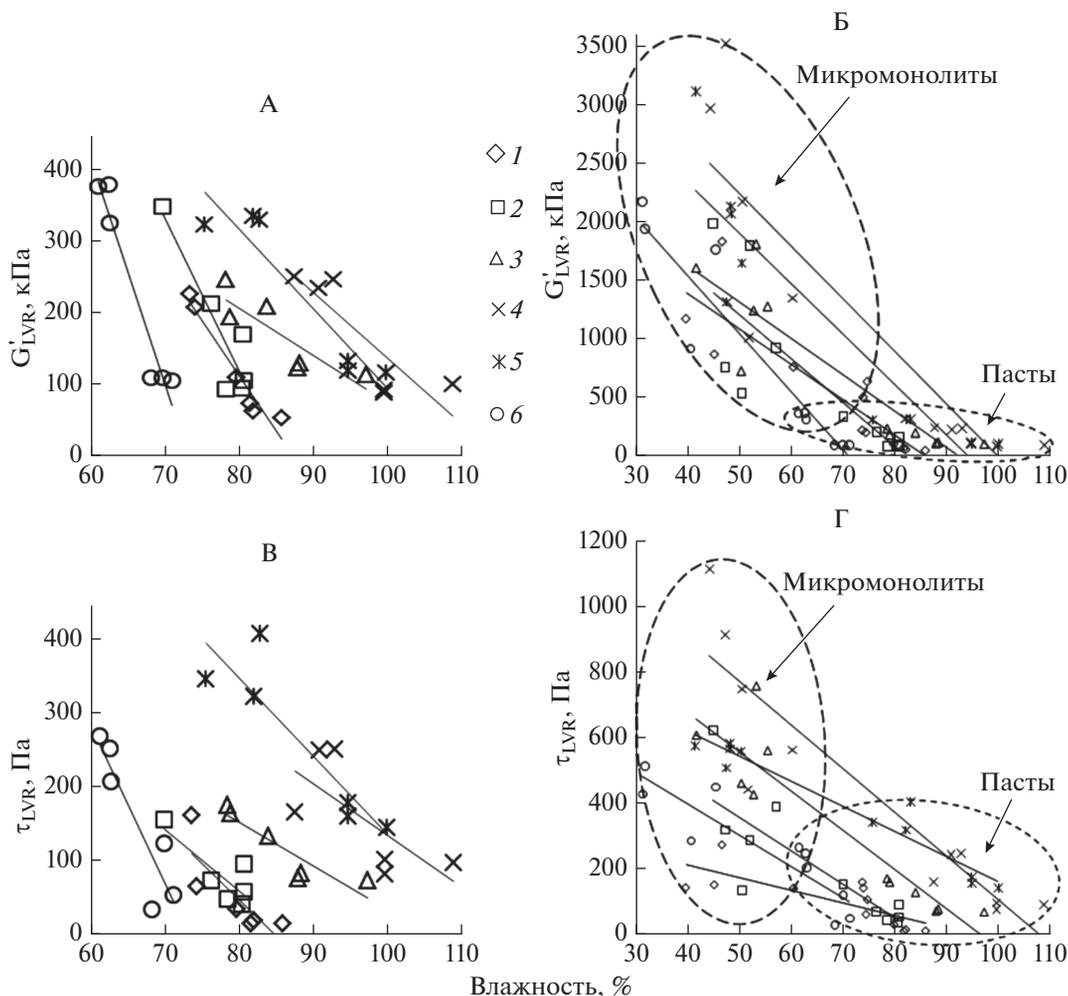


Рис. 4. Связь модуля запаса G'_{LVR} (А, Б) и напряжения сдвига τ_{LVR} (В, Г) в конце линейного диапазона вязкоупругости от влажности образца (прямые линии – аппроксимации для отдельных горизонтов). Образцы: А, В – только пасты; Б, Г – объединенные выборки паст и микромонолитов. Горизонт и глубина: 1 – ASN1, 12–16 см; 2 – ASN1, 19–23 см; 3 – AUb,q,sn, 28–32 см; 4 – AUb,q,sn,v, 45–49 см; 5 – V/Q1ca,nc, 70–74 см; 6 – V/Q2ca,nc, 97–101 см.

V/Q1ca,nc, имеющие сликенсайды; (4) нижняя часть вертикального гор. V/Q2ca,nc. В фазовых координатах G'_{LVR} –W и τ_{LVR} –W (рис. 4) точки, характеризующие каждый из первых трех слоев, представлены приблизительно параллельными полосами, которые последовательно смещаются по диагонали в сторону более высоких значений и влажности, и реологического показателя по мере увеличения глубины почвенных горизонтов. Самый нижний гор. V/Q2ca,nc резко нарушает эту тенденцию. Точки, его характеризующие, оказываются также в виде приблизительно параллельной полосы, но с противоположной стороны от точек, соответствующих выше лежащим горизонтам, в область относительно более низких значений влажности. Такое резкое уменьшение влажности паст из гор. V/Q2ca,nc относительно выше лежащих горизонтов связано с высоким содержанием карбонатов (15.6% CaCO₃) в горизонте.

По характеру изменения напряжения сдвига от деформации $\tau = f(\gamma)$ следует (рис. 5), что все исследованные образцы (и пасты, и монолиты) после точки Crossover переходили в пластическое течение (plastic yielding). По имеющимся в литературе данным, такое поведение было отмечено в гор. В Vertisol из Бразилии, тогда как в верхнем горизонте А этой же почвы отмечалось вязкое течение после хрупкого разрушения (brittle rupture) [17]. Специальный повторный просмотр первичных материалов съемки образцов Vertisols из Техаса (США) и Ставропольского края (Россия), свойства которых опубликованы [4], показал, что во всех горизонтах наблюдался максимум напряжения сдвига в области заданной деформации 1–3% с более низкими значениями τ в области возрастающей γ , что может быть интерпретировано как хрупкое разрушение структуры и вязкое течение после точки Crossover. По неопубликован-

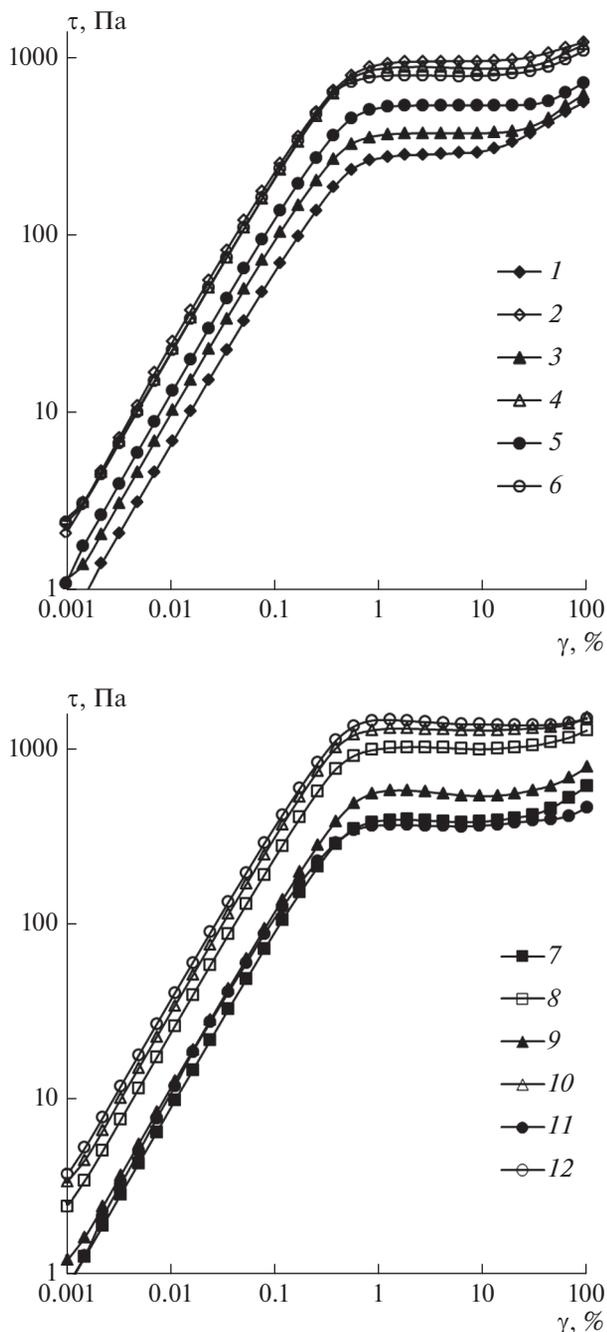


Рис. 5. Зависимость напряжения сдвига (τ) от деформации (γ) в пастах при капиллярном насыщении (1, 3, 5, 7, 9, 11) и после частичного дренажа (2, 4, 6, 8, 10, 12). Горизонты и глубина: 1, 2 – ASN1, 12–16 см; 3, 4 – ASN1, 19–23 см; 5, 6 – AUb,q,sn, 28–32 см; 7, 8 – AUb,q,sn,v, 45–49 см; 9, 10 – V/Q1ca,nc, 70–74 см; 11, 12 – V/Q2ca,nc, 97–101 см.

ным собственным данным, все горизонты незасоленных Vertisols с микрорельефом гильгай на Ейском полуострове, свойства которых описаны в [10, 11], также переходили в состояние вязкого течения после хрупкого разрушения структуры.

В исследованном диапазоне влажности паст некоторые реологические характеристики варьировали, не имея значимой связи с влажностью. Такими характеристиками оказались: (1) значения деформации образца, после которых происходили качественные изменения реологического поведения пасты (γ_{LVR} , $\gamma_{maxG'}$, $\gamma_{Crossover}$); (2) $\lg \delta_{LVR}$; (3) отношение напряжений сдвига $\tau_{LVR}/\tau_{Crossover}$; (4) интеграл I_z . Это означает, что реологическое поведение паст образцов исследуемого Vertic Solonetz в области высокой влажности, близкой к капиллярной влагоемкости, качественно остается одинаковым.

Используя графики $G'_{LVR}-W$ и $\tau_{LVR}-W$ (рис. 4), можно в первом приближении сравнить указанные реологические характеристики в разных горизонтах почвенного профиля при постоянной весовой влажности. Такой анализ показывает, что самый нижний вертикальный гор. V/Q2ca,nc отличается самыми малыми значениями модуля запаса и напряжения сдвига в линейном диапазоне вязкоупругого поведения (G'_{LVR} , τ_{LVR}) и в точке Crossover ($G'_{Crossover}$, $\tau_{Crossover}$) по сравнению со всеми выше лежащими горизонтами почвенного профиля. Иными словами, гор. V/Q2ca,nc обладает наименее выраженными упругими свойствами, в первую очередь будет приобретать переходное состояние пластической деформации и при более сильных напряжениях – состояние пластического течения. Обратим внимание, что такое качественное изменение состояния образца пасты происходит при малых деформациях. А именно, в пастах линейный диапазон вязкоупругого поведения заканчивается после деформации менее 0.1%, а пластическое течение начинается после деформации более 1.5–2%.

Горизонты V/Q1ca,nc и AUb,q,sn,v, расположенные непосредственно над ним, наоборот, отличаются самыми большими значениями G'_{LVR} , τ_{LVR} , $G'_{Crossover}$, $\tau_{Crossover}$. Это означает, что они будут дольше находиться в упругом состоянии, оказывая бронирующее влияние на нижний горизонт и препятствуя его набуханию не только своим весом. В результате можно ожидать развитие давления набухания в гор. V/Q2ca,nc и возникновение внутренних напряжений, достаточных для начала пластического течения при выдавливании части материала в сторону вверх с образованием поверхности скольжения вдоль верхней бронирующей границы с другим почвенным блоком.

Сравнение паст и микромонолитов строго выполнить затруднительно в связи с отсутствием единственного различия. Во-первых, методически измерения произведены с разным зазором между пластинами: 4 мм для паст и 6 мм для микромонолитов. В дальнейшем потребуется отра-

ботка четкой методики вырезания более тонких микромонолитов, чтобы исключить этот методический фактор. Во-вторых, микромонолиты имели более низкую влажность (36–53 мас. %) по сравнению с пастами (65–100 мас. %). Это определялось условиями подготовки паст — насыпанные растертые образцы с исходной плотностью около 1.3 г/см³ свободно набухали в одном направлении при капиллярном увлажнении. В-третьих, различия, обусловленные сложением образца — ненарушенным в микромонолитах и определенным образом упакованным в растертых насыпных образцах паст.

С фактором влажности можно связать существенно более высокие значения G'_{LVR} , G''_{LVR} , $G'_{Crossover}$, τ_{LVR} , $\tau_{Crossover}$ в микромонолитах по сравнению с пастами. Именно эти реологические показатели значимо увеличивались при уменьшении влажности в пастах. Для объединенной выборки паст и монолитов одного слоя также получены значимые линейные регрессии со всеми значимыми коэффициентами регрессии, но с более низким коэффициентом детерминации R^2 (0.67–0.89) по сравнению с выборками, включавшими только пасты (0.97–0.99). При этом общая картина в координатах G'_{LVR} – W для объединенных выборок сохраняется похожей на таковую для выборок, включавших только пасты. Отличие картин заключается в более широком диапазоне влажности для объединенных выборок и в увеличившемся разбросе значений G'_{LVR} , в монолитах.

В этой связи можно сравнить микромонолиты и пасты по реологическим характеристикам, которые не имели значимой связи с влажностью в пастах, а именно по значениям деформации, характеризующим смену качественного состояния образца в испытаниях методом AST, величине $\text{tg} \delta_{LVR}$, отражающей соотношение упругой и вязкой составляющих в линейном диапазоне вязкоупругого поведения, и величине интеграла I_z , по которой Markgraf [24] предложила оценивать жесткость (stiffness) структуры.

В горизонтах верхней части профиля, в которых отмечены признаки солонцового процесса, а именно, собственно солонцовый гор. ASN1 и солонцеватый гор. AUb,q,sn, между микромонолитами и пастами нет значимых различий значений деформации и в конце LVR (γ_{LVR}), и в точке Crossover ($\gamma_{Crossover}$), а также величин $\text{tg} \delta_{LVR}$ и интеграла I_z .

В горизонтах средней и нижней частей профиля, в которых развиты сликенсайды, характеризующие развитие вертигенеза, наоборот, различия значимы. Значения γ_{LVR} , $\gamma_{Crossover}$, $\text{tg} \delta_{LVR}$ и I_z в монолитах заметно меньше (γ_{LVR} 0.03–0.04, $\gamma_{Crossover}$ 1.0–1.2%, $\text{tg} \delta_{LVR}$ 0.09–0.11, I_z 0.4–0.6 безразмерный) по сравнению с пастами (γ_{LVR} 0.06–0.14,

$\gamma_{Crossover}$ 1.6–2.2%, $\text{tg} \delta_{LVR}$ 0.12–0.13, I_z 0.8–1.0 безразмерный).

На основе отмеченных фактов можно предположить, что структурное состояние солонцовых горизонтов, оцениваемое по характеристикам вязкоупругого поведения, мало различается в микромонолитах и в пастах из растертых образцов. Напротив, увеличение γ_{LVR} , $\gamma_{Crossover}$, $\text{tg} \delta_{LVR}$ и I_z в пастах по сравнению с микромонолитами вертикальных горизонтов позволяет допустить, что вертикальные горизонты в естественном состоянии имеют более упорядоченное менее жесткое сложение с субгоризонтально ориентированными глинистыми частицами по сравнению с дезориентированными частицами в пастах из насыпных растертых образцов.

Сравнение реологических характеристик исследованного Vertic Solonetz с литературными данными по Vertisols. Как отмечалось выше, имеется четыре публикации, в которых представлены данные по реологическим характеристикам Vertisols, полученным методом AST [4, 17, 25, 32].

Значения G'_{LVR} обоих горизонтов Vertisol из Бразилии [17, 32] в 4–5 раз больше по сравнению с вертикальным горизонтом в Vertic Solonetz при сопоставимой весовой влажности 60–65% и близких значениях деформации в конце LVR (0.049–0.054 и 0.03–0.05%, соответственно). Точка Crossover в одном образце Vertisol из Бразилии совсем не была достигнута [17], для остальных образцов она наблюдалась при деформациях от 18.2 до 46.5%, а $G'_{Crossover}$ изменялся от 10.5 до 35.5 кПа. В сопоставимом диапазоне влажности 60–65% в Vertic Solonetz величина $\gamma_{Crossover}$ была существенно меньше (1.5–2.5%), а $G'_{Crossover}$ — чуть больше (36–59 кПа). При этом интеграл I_z , характеризующий жесткость структуры, во всех горизонтах Vertic Solonetz изменялся в интервале 0.5–1.3, что в 10–20 раз меньше по сравнению с Vertisol из Бразилии (6.2–29.3). Представленное сравнение числовых значений реологических характеристик позволяет заключить, что оба горизонта Vertisol из Бразилии обладают существенно более жесткой структурой по сравнению с исследованным Vertic Solonetz.

Vertisols с микрорельефом гильгай из Ставропольского края и Техаса [4] в сопоставимом диапазоне влажности 63–88 мас. % имеют такой же диапазон изменения модуля запаса G'_{LVR} (исключение два верхних горизонта на микросклоне и в микропонижении в Ставрополье) как исследованный Vertic Solonez. При этом диапазон линейной вязкоупругости был уже (γ_{LVR} 0.016–0.024%), точка Crossover достигалась при большей деформации ($\gamma_{Crossover}$ 4.17–8.43%), а модули $G' = G''_{Crossover}$ были меньше (4.6–14.4 кПа) по сравнению с ана-

логичными характеристиками горизонтов Vertic Solonetz. Хотя интеграл I_z в цитируемой статье [4] не представлен, по более высоким значениям $\gamma_{\text{Crossover}}$ можно уверенно утверждать, что величина I_z для этих Vertisols должна быть заметно больше, чем в исследованном Vertic Solonetz. Таким образом, Vertisols с микрорельефом гильгай из Ставропольского края и Техаса также отличаются более жесткой структурой, которая проявляет преимущественно упругое поведение в более узком диапазоне начальных деформаций, а достигает точки начала вязкого течения (Crossover) при деформациях в 3–5 раз больших, чем это происходит в разных горизонтах исследованного Vertic Solonetz.

Наиболее вероятной причиной отмеченных различий Vertisols Бразилии, Ставропольского края и Техаса с исследованной почвой являются физико-химические свойства Vertic Solonetz – сравнительно низкая общая концентрация солей в вытяжке из водонасыщенной пасты (0.9–2.7 г/л, EC_{se} 1.3–3.4 дСм/м, что соответствует 0.10–0.32% солей в почве), высокие значения в этой вытяжке pH_{se} (8.5–9.2), общей щелочности (8–22 ммоль(экв)/л), величины SAR (40.5–89.5), и доли обменного натрия (ESP 38–67%).

Сравнение Vertic Solonetz с засоленной глинистой аллювиальной почвой. В статье [26] было отмечена связь величины I_z с долей обменного натрия для естественной (на пастбище) и мелиорированной фосфогипсом почвы Salortidic Fluvaquent из Испании. Сравнение числовых значений (безразмерных) показывает, что I_z в исследованном Vertic Solonetz в несколько раз меньше (0.3–1.4), чем в Salortidic Fluvaquent (5–18). При этом в Vertic Solonetz отсутствует связь между величиной I_z и долей обменного натрия и для паст, и для микромолитов. Коэффициент детерминации не превышал 0.05.

Обе почвы глинистые, имеют близкий диапазон содержания глины и высокое содержание обменного натрия. Различие заключается в степени и химизме засоления. Salortidic Fluvaquent имела более высокую степень засоления (значения удельной электропроводности вытяжки при соотношении почва : вода = 1 : 2.5 от 2.7 до 6.7 дСм/м), слабощелочной интервал значений pH (<8.2) и содержала в некоторых горизонтах небольшое количество гипса. Тогда как Vertic Solonetz имел слабое засоление ($EC_{se} < 3.2$ дСм/м при влажности в 2.5 раза более низкой), сильно щелочную реакцию среды ($pH_{se} > 8.5$) при отсутствии гипса. Из этого следует, что очень низкая жесткость структур Vertic Solonetz, характеризующаяся величиной I_z , обусловлена сочетанием сильно щелочных условий на фоне общей низкой

концентрации солей в растворе и повышенной доли обменного натрия.

Генезис деформационных структур Vertic Solonetz. Полученные реологические характеристики исследованной почвы позволяют выдвинуть гипотезы о механизмах возникновения трех уровней деформационных структур, кратко описанных в разделе “Объекты и методы” настоящей статьи и более полно – в [9].

Средний и нижний уровни представлены горизонтами, в которых имеется система сликенсаидов, отражающих существование латерально восходящих локальных сдвиговых смещений блоков почвы относительно друг друга в разных азимутальных направлениях.

Развитию сдвиговых явлений способствуют следующие факторы. Во-первых, все горизонты почвенного профиля имеют иловато-пылеватый среднеглинистый гранулометрический состав (silty clay по международной классификации). Содержание частиц <1 мкм составляет 34–54%, в нижних горизонтах >45%. Во-вторых, почвенная масса сильно набухает (30–45%) при увлажнении за счет высокой доли неупорядоченных слюдасмектитовых смешанослойных образований в составе ила. В-третьих, почва увлажняется и сверху, и снизу. Глубина грунтовых вод в годовом режиме колеблется в интервале от 0.7 до 1.5 м. После сильных дождей и снеготаяния на поверхности в микропонижениях образуются лужи, которые могут сохраняться от 1–2 нед. до 1–2 мес. Высыхание почвы с образованием трещин происходит к концу лета в наиболее жаркие и засушливые годы.

Отмеченная выше инверсия тенденции изменения зависимости реологических показателей от влажности в профиле исследованного Vertic Solonetz позволяет сформулировать следующую гипотезу.

Почвенная масса гор. V/Q2ca,nc на глубине 90–120 см, находясь постоянно под давлением всего вышележащего профиля почвы, сильно увлажняется раньше всех в профиле за счет близко расположенных грунтовых вод. Она начинает набухать, в ней возникает давление набухания за счет ограничивающей сверху нагрузки, и развиваются внутренние напряжения. При возможных деформациях менее 0.02–0.04% горизонт проявляет преимущественно упругие свойства. При деформации более 0.02–0.04% увлажненная почвенная масса этого горизонта приобретает переходное состояние постепенного пластического изменения, а при деформации более 0.8–1.2% – состояние пластического течения.

Горизонты средней части профиля способствуют такому развитию событий не только собственным весом, но и своим реологическим поведением. В них чуть шире линейный диапазон вязкоупругости (0.03–0.05%) и выше значения

модулей запаса G'_{LVR} и $G'_{Crossover}$ при сопоставимой с нижележащим горизонтом весовой влажности. Соответственно, в условиях более низкой влажности G'_{LVR} и $G'_{Crossover}$ будут еще больше. По этой причине на начальном этапе увлажнения почвенного профиля снизу почвенная масса срединных горизонтов, являясь менее влажной, выступает в качестве бронирующего слоя, ограничивающего набухание нижнего горизонта, и, как следствие, в последнем возникает давление набухания и увеличиваются внутренние напряжения. Учитывая естественную неоднородность почвы и низкую влагопроводность сильнощелочного глинистого горизонта, внутренние напряжения также будут иметь неравномерное распределение по горизонтали. Тогда, согласно гипотезе Maxwell [28, 29], в условиях возникновения горизонтальных напряжений более высоких, чем вертикальные, начинается деформация слоя с выдавливанием части материала из мест с более высокими внутренними напряжениями в области с более низкими напряжениями.

Благодаря временному бронирующему эффекту срединных горизонтов почвенная масса нижнего слоя частично перераспределяется в горизонтальном направлении без заметного изменения верхней границы. В ходе такого перераспределения массы формируются очень пологие (10° – 20° к горизонтали) поверхности скольжения с линейным размером в направлении сдвига до 80–100 см. В области диапироподобной подушки выдавленный материал способствует поступлению воды и гидрогенной аккумуляции карбонатов кальция, усиливая неоднородность слоя в горизонтальном направлении.

Но бронирующий эффект срединных горизонтов является временным, сезонным. Он исчезает после достаточного увлажнения этих горизонтов. Тогда в них самих начинаются аналогичные описанным выше процессы. Отличие состоит в том, что внешняя нагрузка существенно меньше за счет уменьшения мощности вышележащих слоев, которые могут быть не сплошными, а разорванными трещинами на блоки-тумбы. В результате горизонты оказываются более неоднородными как по влажности, так и по другим свойствам. Сдвиговые явления становятся слабее за счет меньшего контраста вертикальных и горизонтальных внутренних напряжений. Это сопровождается уменьшением размеров образующихся сликенсаидов. В срединных горизонтах максимальное проявление имеют иные процессы, в частности, засыпание материала верхних горизонтов в открытые трещины с последующим его сдавливанием при закрытии трещины и вдавливанием в стенки набухающих блоков почвы. Кроме того, сюда по системе субгоризонтальных и вертикальных трещин, возникающей в верхних го-

ризонтах летом за счет потребления влаги травянистой растительностью, достигают небольшие порции суспензий с пептизированными илистыми частицами и растворенными гумусовыми веществами, образующиеся после сильных дождей.

Еще одним фактором латеральной дифференциации срединных горизонтов может быть распределение корневых систем травянистых растений, которые в верхней части профиля куртинами приурочены преимущественно к микроповышениям. Сочетание указанных процессов привело к возникновению цветовой латеральной дифференциации средней части профиля в виде чередования чаше- и воронкообразных темно-серых морфонов AUb,q,sn,ca,v и оливково-бурых выпуклых кверху морфонов Qlv,ca,nc. Существенно более короткая длина волны этих структур (λ 0.4–0.7 м) по сравнению с нижележащими слоем (λ около 1.5 м), очевидно, в значительной степени обусловлена горизонтальным размером блоков-тумб, на которые расчленяется верхняя часть профиля в наиболее сухие годы.

Формирование солонцового гор. ASN в верхней части профиля обусловлено очень сильно выраженными физико-химическими условиями — сильной щелочной реакцией среды, низкой общей концентрацией солей в почвенном растворе, очень высокой долей обменного натрия (46–51%) и суммарной долей обменных натрия и магния (76–84%). Свидетельством вертикальной миграции пептизированной гумусово-глинистой массы являются не только скопления отмытых белесых пылеватых частиц на верхних частях поверхности столчатых отдельностей солонцового горизонта и хорошо выраженные сплошные черные глинистые пленки (кутаны) на гранях агрегатов, но и свежие натечные образования, возникающие после каждого ливня более 10 мм, если перед ним горизонт имел систему открытых вертикальных трещин.

По реологическим показателям, для солонцового горизонта были характерны более низкие значения G'_{LVR} , G''_{LVR} , γ_{LVR} , τ_{LVR} , $G'_{Crossover}$, более высокие $\text{tg}\delta_{LVR}$ в пастах и тенденция к более высокому I_z в микромонолитах по сравнению со срединными горизонтами, и сопоставимые значения большинства этих показателей с таковыми для самого нижнего горизонта. Вместе с тем объяснить наблюдаемый микрорельеф гильгай с длиной волны 0.7–1.1 м, которая не согласуется с разными длинами волн среднего и нижнего уровня деформационных структур, пока затруднительно.

ВЫВОДЫ

1. Все горизонты Vertic Solonetz и в пастах, и в микромонолитах демонстрировали однотипный характер вязкоупругого поведения с двумя особенностями. Первая из них — это постепенное

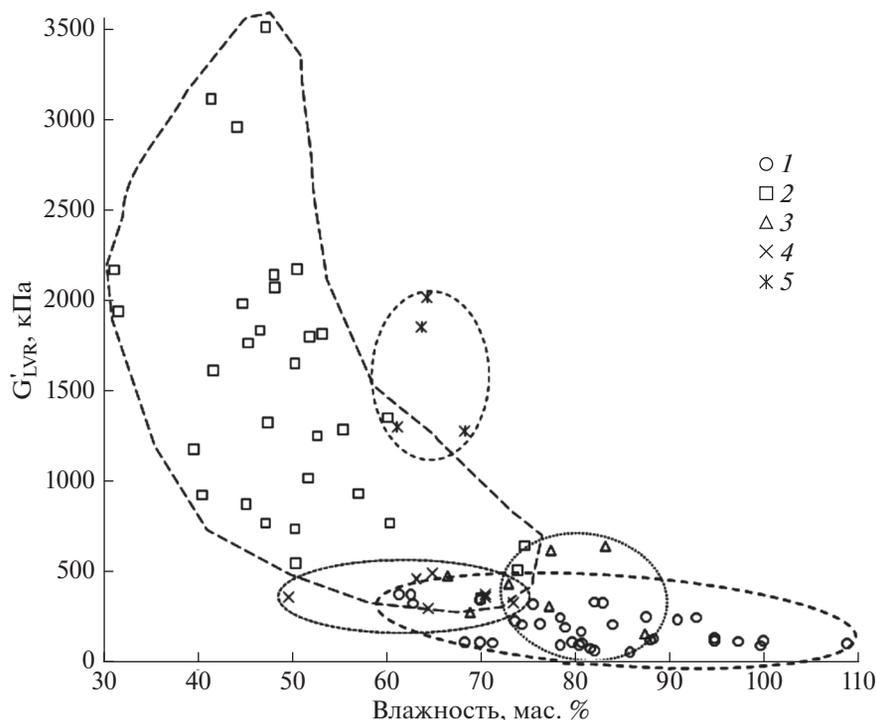


Рис. 6. Сравнение модуля запаса G'_{LVR} в разных почвах. Образцы: 1, 3, 4, 5 – пасты; 2 – монолиты. Почва, регион: 1, 2 – Vertic Solonetz, Каменная Степь; 3 – Vertisols, Ставрополье [4]; 4 – Vertisols, Техас [4]; 5 – Vertisols, Бразилия [17].

разрушение микроагрегатов в переходном состоянии пластической деформации образца в интервале от конца линейного диапазона вязкоупругости до точки Crossover, выражающееся в увеличении модуля потерь G'' до максимальных значений в этом интервале деформации образца. Вторая особенность – после точки Crossover образцы переходили в состояние пластического течения (plastic yielding), которое идентифицируют по участку относительной стабилизации, а затем продолжающемуся замедленному увеличению напряжения сдвига при возрастающей деформации образца.

2. Структуры в пастах и микромонолитах Vertic Solonetz имели очень низкую жесткость (интеграл I_z не превышал 1.3). Наиболее вероятная причина – сочетание сильно щелочной реакции среды ($pH > 8.5$), общей низкой концентрации солей в растворе ($EC_{se} < 3.2$ дСм/м) и высокой доли обменного натрия ($>38\%$) по всему почвенному профилю.

3. Предложена гипотеза формирования трех уровней деформационных структур в профиле Vertic Solonetz с микрорельефом гильгай. Гипотеза основана на реологических характеристиках вязкоупругого поведения разных горизонтов почвенного профиля.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 17-04-00555 и 16-04-01111.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аbrukова Л.П. Изучение тиксотропных свойств почв с применением ротационного вискозиметра РВ-8 // Почвоведение. 1970. № 8. С. 83–91.
2. Горбунов Н.И., Аbrukова Л.П. Реологические свойства и минералогический состав слитых почв // Почвоведение. 1974. № 8. С. 74–85.
3. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.
4. Жукова Ю.А., Хайдапова Д.Д., Ковда И.В., Моргунов Е.Г. Реологические характеристики слитоземных комплексов почв в разных климатических условиях // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 3. С. 25–30.
5. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. Ключева В.В., Хайдапова Д.Д. Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 2017. Вып. 89. С. 21–35.
7. Манучаров А.С. Основы реологии в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 91 с.

8. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
9. Хитров Н.Б. Слитогенез в почвах Центрально-черноземных областей России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 935–943.
10. Хитров Н.Б., Власенко В.П., Rogovneva L.V. Статистические показатели чаше- и диапироподобных морфоструктур вертисолей Воронцовской пади // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 3–28.
11. Хитров Н.Б., Зазовская Э.П., Rogovneva L.V. Морфология, радиоуглеродный возраст и генезис вертисолей Уйского полуострова (Кубано-Приазовская низменность) // Почвоведение. 2018. № 7. С. 773–786. doi 10.1134/S0032180X18070055
12. Хитров Н.Б., Rogovneva L.V. Двумерное распределение свойств вертикального солонца с микрорельефом гильгай в Каменной Степи // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1–14. doi 10.1134/S0032180X18110035
13. Baumgarten W. Soil microstructural stability as influenced by physicochemical parameters and its environmental relevance on multiple scales. Kiel, 2013. 263 p.
14. Baumgarten W., Neugebauer Th., Fuchs E., Horn R. Structural stability of marshland soils of the riparian zone of the tidal Elbe river // Soil and Tillage Research. 2012. V. 125. P. 80–88. doi 10.1016/j.still.2012.06.002
15. Ghezzehei T.A., Or D. Rheological properties of wet soils and clays under steady a oscillatory stresses // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. V. 65. P. 624–637.
16. Hallsworth E.G., Robertson G.K., Gibbons F.R. Studies in pedogenesis in New South Wales. VII. The “Gilgai” soils // J. Soil Sci. 1955. V. 6. № 1. P. 1–31.
17. Holthusen D., Pértile P., Reichert J.M., Horn R. Controlled vertical stress in a modified amplitude sweep test (rheometry) for the determination of soil microstructure stability under transient stresses // Geoderma. 2017. V. 295. P. 129–141. doi 10.1016/j.geoderma.2017.01.034
18. Holthusen D., Peth S., Horn R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters // Soil and Tillage Research. 2010. V. 111. P. 75–85. doi 10.1016/j.still.2010.08.002
19. Holthusen D., Reeb D., Horn R. Influence of potassium fertilization, water and salt stress, and their interference on rheological soil parameters in planted containers // Soil and Tillage Research. 2012. V. 125. P. 72–79. doi 10.1016/j.still.2012.05.003
20. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources, 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports № 103. FAO, Rome, 2007. 116 p.
21. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports № 106. FAO, Rome, 2015. 192 p.
22. Keller T., Lamandé M., Peth S., Berli M., Delenne J.-Y., Baumgarten W., Rabbel W., Radjaï F., Rajchenbach J., Selvadurai A.P.S., Or D. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction // Soil & Tillage Research. 2013. V. 128. P. 61–80. doi 10.1016/j.still.2012.10.004
23. Khaidapova D.D., Chestnova V.V., Shein E.V., Milanovskii E.Yu. Rheological Properties of Typical Chernozems (Kursk Oblast) under Different Land Use // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. № 8. P. 890–897. doi 10.1134/S1064229316080044
24. Markgraf W. Rheology in soils // Encyclopedia of Agrophysics. Springer Science + Business Media B.V. 2011. P. 700–705. doi 10.1007/978-90-481-3585-1
25. Markgraf W., Horn R., Peth S. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils // Soil & Tillage Research. 2006. V. 91. P. 1–14. doi 10.1016/j.still.2006.01.007
26. Markgraf W., Moreno F., Horn R. Quantification of microstructural changes in salorthidic fluvaquents using rheological and particle charge techniques // Vadose Zone J. 2012. V. 11. Iss. 1. P. 1–11. doi 10.2136/vzj2011.0061
27. Markgraf W., Watts C.W., Whalley W.R., Hrkac T., Horn R. Influence of organic matter on rheological properties of soil // Applied Clay Science. 2012b. V. 64. P. 25–33. doi 10.1016/j.clay.2011.04.009
28. Maxwell B. Influence of Horizontal Stresses on Gilgai Landforms // J. Geotech. Eng. 1994. ASCE 120. P. 1437–1444.
29. Maxwell B. The Origin of Hog-wallows and Gilgai Landforms – PART I. 2013. <http://thecosmiccorner.blogspot.ru/2013/10/the-origin-of-hogwallows-and-gilgai.html>
30. Mezger T.G. The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers. 3rd revised edition. Hanover: Vincentz Network, 2011. 436 p.
31. Paquet H., Bocquer G., Millot G. Néoformation et dégradation des minéraux argileux dans certains solonetz solodisés et Vertisols du Tchad // Bull. Serv. carte geol. Als. Lorr. Strasburg. 1966. V. 19. P. 295–322.
32. Pértile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., Costa A. Rheological Parameters as Affected by Water Tension in Subtropical Soils // Rev. Bras. Cienc. Solo. 2016;40:e0150286. doi 10.1590/18069657rbc20150286
33. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second edition. Agric. Handbook 436. Washington, DC, USDA, NRCS. 1999. 871 p.
34. Van der Meer K. Gilgai morphology of the Lufira Plain. In: 8th Intern. Congress of Soil Science. Transactions. 1964. V.V. Bucharest, Romania. P. 697–701.
35. White E.M., Bonestell R.G. Some gilgaied soils in South Dakota // Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1960. V. 24. № 4. P. 305–309.

Viscoelastic Behaviour of Vertic Solonetz at the Kamennaya Steppe

N. B. Khitrov^{a,*} and D. D. Khaydapova^b

^a*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: khitrovn@gmail.com*

The aim is to determine viscoelastic behaviour parameters of soil pastes and micromonolites of natric and vertic horizons from soil profile Vertic Solonetz at Kamennaya Steppe (Russia, Voronezh region) and to use rheological properties to explain a formation of three inharmonious alteration structure levels with different wavelength and deformation pattern. Rheological properties for 6 horizons were determined by amplitude sweep tests (AST) using rheometer MCR-302 with parallel plates. Common character of viscoelastic behaviour of soil pastes and micromonolites, relationship between storage modulus G'_{LVR} at the linear range of viscoelasticity and paste or micromonolite moisture, distribution of rheological properties along soil profile, relationship between exchangeable sodium percentage and integral I_z which value is used for structural stiffness evaluation are discussed. Rheological properties of Vertic Solonetz are compared with published data for Vertisols from Brazil, Russia, USA and for saline-sodic clay alluvial soil from Spain. Hypothesis about soil profile formation of Vertic Solonetz with gilgai topography is suggested. The hypothesis is based upon viscoelastic behaviour of studied soil horizons.

Keywords: rheological properties, linear range of viscoelasticity, storage modulus, loss modulus, slickensides