

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

УДК 631.43

### АГРЕГАТНАЯ СТРУКТУРА ЕСТЕСТВЕННЫХ И ПАХОТНЫХ ПОЧВ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА: МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2021 г. А. Б. Умарова<sup>а, \*</sup>, М. А. Бутылкина<sup>а</sup>, М. М. Сусленкова<sup>а</sup>, М. С. Александрова<sup>б</sup>,  
З. С. Ежелев<sup>а</sup>, М. В. Хмелева<sup>а</sup>, А. К. Шхапацев<sup>с</sup>, А. И. Гасина<sup>а</sup>

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

<sup>б</sup> Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля,  
ул. Глебовская, 20Б, Москва, 107258 Россия

<sup>с</sup> Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, Майкоп, 385000 Россия

\*e-mail: a.umarova@gmail.com

Поступила в редакцию 09.03.2021 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

Агрегаты и капиллярно-насыщенные пасты суглинистых дерново-подзолистых почв (Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic)), типичных и слитых черноземов (WRB – Haplic Chernozems (Loamic, Aric, Pachic) и Vertisols), желтоземов (WRB – Alisols) в их естественном состоянии и агроиспользовании исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и на ротационном вискозиметре “Реотест-2” с коаксиальной цилиндрической системой. Агрегаты пахотных горизонтов дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного имеют менее выраженную пористость и более плотную упаковку микроагрегатов по сравнению с естественными почвами. Для слитых черноземов наблюдается обратная картина – при больших увеличениях фиксируется микроагрегированность пахотного слоя, в то время как в гумусово-аккумулятивном горизонте залежи срез агрегата представлен слитой массой. Реологическое поведение почв выявило преобладание конденсационно-кристаллизационных структурных связей в пахотных слоях, сменяющихся с глубиной преобладанием коагуляционных структур, за исключением черноземов слитых, в верхних горизонтах которых хорошо развита коагуляционная структура и проявляется тиксотропия. Предел пластично-вязкого разрушения структуры более высокий в почвах, не вовлеченных в сельскохозяйственное использование, а “предел Шведова”, соответствующий началу деформационных процессов, напротив, ниже. Все исследованные образцы почв имели несколько пределов прочности, что свидетельствует об иерархической организации структуры почвенных агрегатов.

*Ключевые слова:* дерново-подзолистые почвы, черноземы типичные, слитые черноземы, желтоземы, структурная организация почв, реология, конденсационные связи, кристаллизационные связи, СЭМ

DOI: 10.31857/S0032180X21090136

#### ВВЕДЕНИЕ

Стартовой характеристикой любой почвы является ее морфологическое описание, обязательно включающее характеристику структуры почвенных горизонтов и слоев. Согласно концепции иерархии структурных уровней организации почв [4], агрегатный уровень формируется в процессе почвообразования путем взаимодействия элементарных почвенных частиц, приводящего к появлению характерных для каждого типа почвообразования микроагрегатов, агрегатов и новообразований. По сути, данный уровень – это начальный этап пространственной организации твердой фазы почв, во многом наследуемый от материнской породы и трансформируемый процессами почвообразования. Именно поэтому в становле-

нии направлений исследования почвенной структуры, аспектов ее образования и свойств работали многие выдающиеся отечественные ученые-почвоведы: С.А. Захаров, В.Р. Вильямс, И.Н. Антипов-Каратаев, К.К. Гедройц, П.В. Вершинин, С.И. Долгов, Н.А. Качинский, А.Д. Воронин, Б.Г. Розанов и другие.

В настоящее время можно выделить 3 основных направления изучения почвенной структуры, имеющих свою историю развития и весьма связанных между собой.

*Первая группа* исследований направлена на анализ морфологии и распределения агрегатов по размерам. Одной из первых работ в области изучения почвенных агрегатов явилась работа Захарова [8], которая и в настоящее время традицион-

но используются в отечественном почвоведении при морфологическом описании почв. На западе первые упоминания о классификации агрегатов по их форме можно встретить у Кинга в 1907 г. [36]; в 1934 г. эта работа была дополнена и детализирована Бейвером [30], а в 1937 г. Департаментом сельского хозяйства США издано руководство по полемому исследованию почв, используемое и в настоящее время и включающее морфологическое описание структуры на основе этих работ [42]. Предприняты успешные попытки связать форму агрегатов, гранулометрический состав и тип почвообразования [9], выявлены диагностические признаки морфологии агрегатов отдельных генетических горизонтов [16]. По мере развития инструментальных методов исследования почв широкое развитие получило изучение микроморфологических характеристик [27, 36, 41], в том числе неразрушающими методами рентгеновской компьютерной томографией [18, 29, 41] и сканирующей электронной микроскопией [34, 43].

В современном почвоведении считается общепринятым понятие структуры как распределения агрегатов по форме и размерам. На его основе используется целый ряд оценочных параметров структуры для успешного роста и развития культурных растений: содержание агрономически ценных агрегатов [10], коэффициент структурности АФИ [3], средневзвешенный и среднегеометрический диаметры агрегатов [19, 37].

*Вторая группа* исследований анализирует структуру почв с точки зрения выполняемых ею функций – способности удерживать и проводить влагу, растворенные вещества и воздух, формировать и дифференцировать среду обитания для живых организмов [5, 33]. Предприняты попытки связать форму агрегатов и их пространственное расположение в составе почвенных горизонтов на передвижение в них влаги [13]. Большое внимание уделяется поровому пространству почвы (распределению пор по размерам, форме, извилистости, непрерывности, функциям) и свойствам поверхности твердой фазы почв (гидрофобности, сорбируемости, ее площади и пр.) [45, 47] и их изменению, что может влиять на сорбционные и транспортные характеристики почв [31, 32, 48].

*Третья группа* исследований направлена на изучение устойчивости почвенных агрегатов при воздействии естественных и антропогенных факторов. Устойчивость почвенных агрегатов в первую очередь оценивается по воздействию на них влаги [22, 28, 38, 44], разработаны различные методы и критерии оценки водоустойчивости структуры [19, 35].

Среди методов почвенной физико-механики в последние годы особую популярность приобрели реометрические методы, исследующие силу сцепления частиц почв, процессы разрушения и восста-

новления связей между ними, и отражающие морфологию почвенных частиц [40, 43].

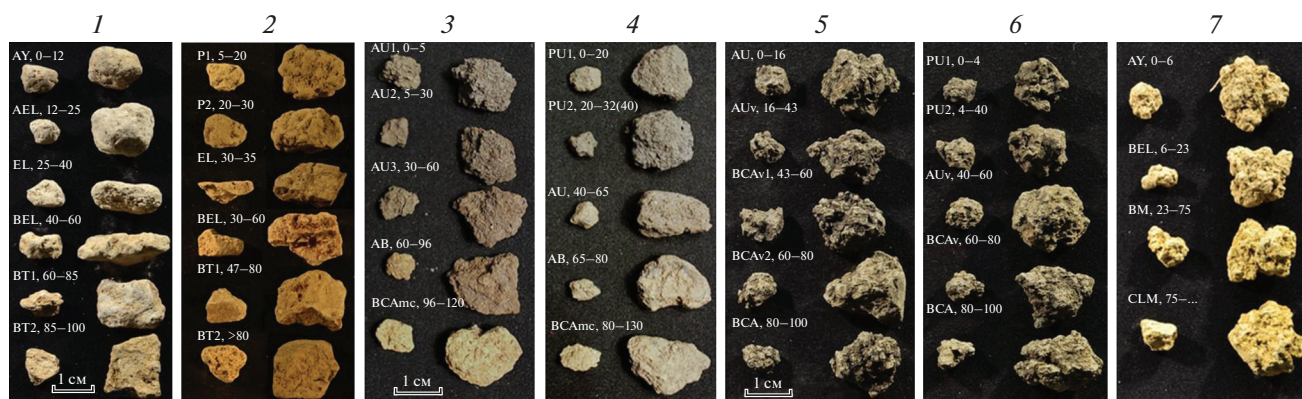
При сельскохозяйственном использовании земель возможна быстрая трансформация структуры почв [12, 20, 21, 46], причем установлено, что сразу после вспашки происходит временное увеличение пористости почвы, затем постепенная усадка с изменением геометрии пор, нарушением их связности, что сказывается на гидрофизических свойствах почв [28, 39]. При длительном воздействии сельскохозяйственной техники меняются формы и ориентации макропор с неизменяемым изменением микро- и мезопористости, что приводит к уплотнению почв на некоторой глубине от поверхности [17, 25]. Иной эффект оказывают корневые системы растений, способствуя созданию стабильной и связанной системы биопор, улучшающей транспорт воды и газов [10, 39].

В данной работе основное внимание будет сосредоточено на рассмотрении структуры как формы агрегатов, их микроструктурности и устойчивости к механическому воздействию в зональном ряду почв европейской части РФ и при сравнении естественных и пахотных почв. Были поставлены следующие задачи: 1 – подобрать зональный ряд естественных и пахотных почв, имеющих тяжелый гранулометрический состав и отличающихся спецификой морфологического строения и типом землепользования; 2 – исследовать почвенную микроструктуру во взаимосвязи с генезисом почв и морфологией почвенных агрегатов; 3 – изучить реологическое поведение исследуемых почв как характеристику почвенной микроструктурности и ее устойчивости при увеличении внешней нагрузки.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Объектами исследования** явились [11]: дерново-подзолистые почвы Московской области под лесом и пашней, чернозем типичный мощный Курской области под лесом и под пашней, чернозем слитой Республики Адыгея под залежью с кустарниковой растительностью и пашней, желтозем дендрария г. Сочи. Рассмотрим их профильное строение.

Дерново-подзолистая почва под лесом согласно “Классификации и диагностике...” [26] (WRB – Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic)) представляет собой постлитогенную текстурно-дифференцированную дерново-палево-подзолистую почву на покровных суглинках, подстилаемых мореной и расположенную под пологом смешанного леса, представленного елью, березой, бересклетом, орешником, папоротником, мхами, GPS-координаты: 56°05′59.6″ N, 37°49′09.4″ E. Почва имеет следующее строение профиля: O (0–3 см) – AY (3–12 см) – AEL (12–25 см) – EL (25–40 см) –



**Рис. 1.** Морфология агрегатов: 1 – дерново-подзолистой почвы под лесной растительностью; 2 – дерново-подзолистой почвы под пашней; 3 – чернозема типичного под лесной растительностью; 4 – чернозема типичного под пашней; 5 – чернозема слитого под залежью; 6 – чернозема слитого под пашней; 7 – желтозема.

BEL (40–60 см) – BT1 (60–80(85) см) – BT2 (80(85)–140 см). Верхние легкосуглинистые горизонты глубже 40 см сменяются среднесуглинистыми. Гумусовые горизонты имеют комковатую структуру, в оподзоленных выражена плитчатость агрегатов, а иллювиальные слои имеют агрегаты призматической формы (рис. 1, 1). Дерново-подзолистая почва под пашней [26] (WRB – Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic)) – постлитогенная текстурно-дифференцированная типичная агродерново-подзолистая среднесуглинистая среднеспособная на покровных суглинках, подстилаемых моренной, расположена на опытном поле Почвенного института им. В.В. Докучаева (GPS: 56°08'01.2" N, 37°48'07.3" E). Строение профиля: PU1 (5–20 см) – PU2 (20–30 см) – BEL (30–60 см) – BT1 (60–80 см) – BT2 (>80 см). В ней утяжеление гранулометрического состава наблюдается с глубины 60 см, а почвенная структура в нижней старопашотной части гумусового слоя, включающей часть оподзоленного горизонта, приобретает плитчато-ореховатую структуру. Нижние горизонты имеют схожую форму агрегатов.

Следующая группа объектов исследования представлена черноземами типичными Курской области на лёссовидных суглинках [24]. Почва под лесом – это постлитогенный аккумулятивно-гумусовый чернозем миграционно-мицеллярный на тяжелом лёссовидном суглинке [26] (WRB – Haplic Chernozems (Loamic, Aric, Pachic)), расположенный на территории Стрелецкого участка ЦЧ ГПБЗ имени проф. В.В. Алехина под покровом дубравы снытевой урочища Дуброшина (GPS: 51°33'55.2" N, 36°05'15.4" E). Строение его профиля следующее: AU (0–5 см) – AU2 (5–30 см) – AU3 (30–60(70) см) – AB (60(70)–96(100) см) – BCAmc1 (96(100)–120 см) – BCAmc2 (120–...см). Гумусовые горизонты имеют комковато-зернистую структуру с появлением слабой плитчатости в нижней части, глубже зернистые агрегаты фор-

мируют слабо выраженные глыбисто-призматические структурные элементы (рис. 1, 3). Чернозем типичный под пашней или постлитогенный аккумулятивно-гумусовый агрочернозем миграционно-мицеллярный на лёссовидном суглинке [26] (WRB – Haplic Chernozems (Loamic, Aric, Pachic)), располагается под посевами злаков на опытном поле Курского НИИ АПП (GPS: Координаты 51°37'17.1" N, 36°15'42.0" E). Строение профиля: PU1 (0–20 см) – PU2 (20–40 см) – AU (40–65 см) – AB (65–80 см) – BCAmc1 (80–110(130) см) – BCAmc2 (110(130)–...см). Пахотные слои до глубины 40 см представлены мелкозернисто-порошистой структурой переходящей в мелкозернистую с признаками плитчатости в горизонте AB, нижняя часть профиля имеет выраженную глыбисто-призматическую структуру.

Были исследованы слитые черноземы на делювиальных глинах в Майкопском районе Республики Адыгея [6]. Чернозем слитой (вертисоль) под залежью представлен постлитогенным аккумулятивно-гумусовым черноземом слитизированным на делювиальных глинах и расположен под кустарниковой растительностью [26] (WRB – Vertisols), преимущественно черноплодным боярышником и злаковыми травами (GPS: 44°43'13.9" N, 40°03'37.3" E). Строение профиля: AU1 (0–5 см) – AU2 (5–16 см) – AUv (16–43 см) – BCav (43–...см). Верхние горизонты имеют комковато-зернистую структуру, уже с глубины 16 см переходящую в глыбисто-призматическую (рис. 1, 5).

Чернозем слитой пахотный расположен на полях ФГБНУ “Адыгейский научно-исследовательский институт сельского хозяйства” под подсолнечником (GPS: 44°43'15.9" N, 40°03'36.3" E). Строение профиля: PU1 (0–4 см) – PU2 (4–40 см) – AUv (40–... см). В данном варианте почв только верхние 4 см имеют зернистую структуру, глубже почвенные горизонты состоят из глыбисто-призм-

матических структурных отдельностей. Обращает внимание наличие в профилях изученных слитых почв мелких камней размером менее 2–3 мм.

Был исследован желтозем, который по “Классификации и диагностике...” [26] (WRB – Alisols) относится к постлитогенным структурно-метаморфическим желтоземам (элювиально-поверхностно-глеявая почва на желтоцветном делювии) и располагается в Краснодарском крае в дендрарии ФГБНУ ВНИИЦиСК г. Сочи под злаковыми травами, мандаринами, фейхоа (GPS: 43°34'05" N, 39°44'55" E). Строение профиля: AY (0–6(10) см) – BEL (6(10)–19(23) см) – BM (19(23)–73(75) см) – CLM (73(75)–...см). Его отличает комковато-порошистая и комковатая структура верхних горизонтов и бесструктурность почвы с глубины 19–23 см.

Таким образом, все исследованные почвы имеют тяжелый гранулометрический состав от легко до среднесуглинистого состава и следующее разнообразие структуры: верхних горизонтов – комковатая, порошистая или зернистая; средних и нижних – комковатая, глыбистая, призматическая или бесструктурная.

**Методы исследования.** Полевое морфологическое описание структуры почв проводилось по методу Захарова [16]. Для определения основных физических свойств почв использовали классические методы физики почв: плотность почвы определяли буровым методом с объемом бура 100 см<sup>3</sup> [3]; плотность твердой фазы почв – пикнометрическим методом, агрегатный состав почв – методом сухого просеивания по Саввинову, содержание общего углерода – методом сухого сжигания на анализаторе АН-7529М [19]. Гранулометрический анализ почв был проведен с использованием метода лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц “Analysette 22 comfort” (Fritsch, Германия). Диспергирование образцов осуществлялось на ультразвуковой установке Digital Sonifier S-250D (Branson Ultrasonics, США). Энергия ультразвука составила 450 Дж/мл.

Для изучения микроструктуры были выбраны 3 агрегата преобладающего размера из диапазона агрономически ценных агрегатов из каждого горизонта. Помимо исследования микростроения их поверхности, изучались особенности внутреннего строения. Для этого были сделаны сколы тонким лезвием по линии, проходящей через центр агрегата. Съемку поверхностей и сколов проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JEOL, JSM-6380LA при увеличениях от  $\times 30$  до  $\times 7000$ . Пробоподготовку, съемку и анализ снимков вели по ранее апробированной на образцах разного генезиса методике [43]. Количество снимков для каждого почвенного горизонта в зависимости от содержания в нем органического вещества составило от 70 до 200 для вы-

бора наиболее типичных картин рельефа поверхностей, дающих представление об особенностях пространственной организации агрегатов. Такой подход был применен впервые.

Основные реологические характеристики почв получали на ротационном вискозиметре “Реотест-2” с коаксиальной цилиндрической системой, имеющей рабочий объем 17 мл [19]. Пробоподготовку проводили следующим образом: воздушно-сухой образец растерли пестиком с резиновым наконечником, просеивали через сито 1 мм. Навеску почвы массой 17 г помещали в бюкс и капиллярно насыщали в течение суток для приобретения вязко-текучей консистенции. Измерения зависимости напряжения сдвига или вязкости почвенной суспензии от скорости сдвига проводили в диапазоне скоростей от 0.1667 до 72.9 с<sup>-1</sup>. Каждый цикл имел 12 скоростей и состоял из прямого и обратного ходов – увеличения и уменьшения нагрузки. На основании полученных значений были построены реологические кривые исследуемых образцов. По кривым течения и кривым вязкости были определены следующие реологические параметры:  $\eta_{P_{к1}}$  – вязкость начала течения, наибольшая структурная вязкость ( $\gamma = 0.1667$  с<sup>-1</sup>);  $\eta_{кон}$  – конечная эффективная вязкость образца, которая соответствует наименьшей скорости деформации ( $\gamma = 0.1667$  с<sup>-1</sup>) по обратной реологической кривой;  $\eta_{мин}$  – минимальная структурная вязкость;  $P_{к1}$  – напряжение сдвига, соответствующее началу течения образца ( $\gamma = 0.1667$  с<sup>-1</sup>);  $P_{к2}$  – динамический предел текучести, соответствует началу разрушения;  $P_m$  – напряжение сдвига, соответствующее полному разрушению структуры;  $P_{к1}/P_{к2}$  – характеристика прочности образуемых связей;  $P_m/P_{к1}$  – характеристика диапазона напряжений, при которых разрушается структура. Обработку данных вели в электронных пакетах Excel и Statistica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Основные свойства почвы,** обуславливающие свойства поверхности твердой фазы и почвенной структуры, представлены в табл. 1. Гранулометрический состав верхних горизонтов черноземов был закономерно тяжелее, чем у дерново-подзолистых почв, и соответствовал суглинку тяжелому.

В черноземах слитых обнаружено самое высокое содержание физической глины (<0.01 мм) – более 60% – с практически полным отсутствием дифференцированности во всем профиле почв. Сходным гранулометрическим составом представлены горизонты профиля желтозема, за исключением более легкого верхнего горизонта. Профили чернозема типичного являются менее однородными и более легкими по гранулометри-



**Таблица 1.** Некоторые физические и химические свойства исследуемых почв

Горизонт	Глубина, см	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> *	Содержание гранулометрических фракций, % от объема				$C_{\text{общ}}$ , %*
			<0.002 мм	0.002–0.05 мм	>0.05 мм	физическая глина, <0.01 мм	
Дерново-подзолистая почва под лесной растительностью							
AУ	0–12	2.35	12.83	85.49	1.68	42.73	2.79
AEL	12–25	2.44	9.03	87.88	3.09	34.28	1.8
EL	25–40	2.3	15.69	82.60	1.71	42.57	0.28
BEL	40–60	2.6	17.14	81.10	1.76	46.05	0.25
BT2	60–85	2.72	20.11	79.04	0.85	52.67	0.21
Дерново-подзолистая почва под пашней							
P1	0–18	2.53	8.21	46.45	45.34	32.51	1.3
P2	18–36	2.58					
EL	36–42	2.58	7.25	44.21	48.54	28.17	1
ELB	42–51	2.56	8.83	43.33	47.84	30.39	0.41
BT1	50–80	2.75	12.00	39.58	48.42	33.1	0.35
BT2	80–95	2.75	13.87	47.78	38.35	40.59	0.18
Чернозем типичный под лесной растительностью							
AU1	0–5	2.20	14.20	60.00	25.80	50.68	3.8
AU2	5–30	2.30	19.91	60.85	19.24	60.03	3.14
AU3	30–60	2.43	13.69	55.77	30.54	43.81	2.15
AB	60–96	2.42					1.05
BCAmcl	96–110	2.50	26.14	43.69	30.17	59.02	2.27
Чернозем типичный под пашней							
PU1	0–20	2.38	24.58	39.36	36.06	54.72	2.76
PU2	20–40	2.40	25.19	55.04	19.77	63.34	3.07
AU	40–65	2.36	24.11	34.44	41.45	49.15	2.54
AB	65–80	2.38	17.62	42.73	39.65	44.37	1.75
BCAmcl	80–...	2.63	26.71	50.67	22.62	60.32	1.31
Чернозем слитой под залежью							
AU2	5–16	2.52	19.65	65.72	14.63	64.7	4
AUv	16–43	2.55	19.67	65.70	14.63	64.64	3.46
BCAv1	43–60	2.59	20.50	66.20	13.30	65.96	3.15
BCAv2	60–80	2.67	20.42	65.66	13.92	65.4	1.91
Чернозем слитой под пашней							
PU1	0–4	2.54	20.01	68.32	11.67	66.43	3.19
PU2	4–40	2.57	22.92	68.13	8.95	68.67	2.76
AUv	40–60	2.65	20.43	63.70	15.87	62.65	1.83
BCAv	60–80	2.60	20.67	67.35	11.98	66.68	1.65
Желтозем							
AУ	0–6	2.66	20.70	58.69	20.61	54.6	1.5
BEL	6–23	2.68	23.22	61.40	15.38	60.39	0.87
BM	23–75	2.70	25.06	60.46	14.48	62.25	0.51
CLM	75–...	2.73	23.75	58.86	19.39	60.56	0.52

\* Медианные значения.

ческому составу. В черноземе типичном под пашней содержание физической глины больше, чем в лесном аналоге. В дерново-подзолистых почвах наблюдается закономерно меньшее содержание тонких фракций, причем в лесной почве содержание физической глины во всех горизонтах больше по сравнению с пахотной почвой. Изменение гранулометрического состава по профилю дерново-подзолистых почв отражает процессы почвообразования, наименьшее содержание физической глины выявлено для горизонтов AEL и EL, наибольшее – для горизонтов BT.

Значения плотности почв и плотности твердой фазы почв соответствуют типичным диапазонам согласно их генезису. Наибольшими величинами плотности твердой фазы выделяется профиль желтоземов, содержащий значительные количества железа [16], а наименьшими – типичный чернозем с высоким содержанием общего углерода, который в верхних слоях представлен органическим веществом, а в нижних – карбонатами [21]. В слитом черноземе повышенные значения плотности твердой фазы связаны с их генезисом:

**Таблица 2.** Свойства структуры исследуемых горизонтов почв (ситовой анализ)

Тип землепользования	Горизонт, глубина, см	$\Sigma$ (10–0.25), %	>10 мм, %	Оценка структуры
Дерново-подзолистая почва				
Лесная растительность	AУ, 3–12	42.9	50.0	Хорошая
	EL, 25–40	53.9	21.5	Отличная
	BEЛ, 40–60	73.1	11.5	Отличная
	BT1, 60–85	33.7	63.0	Неуд.
	PU1, 5–20	48.5	49.0	Хорошая
	PU2, 20–30	53.9	45.0	Хорошая
Пашня	BEЛ, 30–60	71.7	25.5	Отличная
	BT1, 60–80	28.5	71.5	Неуд.
	Чернозем типичный			
Лесная растительность	AУ2, 5–30	66.4	5.5	Отличное
	AУ3, 30–60	67.7	31.5	Отличное
	BCA, 96–110	53.1	46.5	Хорошее
	PU1, 0–20	63.2	36.5	Отличное
Пашня	AУ, 40–65	66.7	13.5	Отличное
	BCA, 80–130	48.9	51.0	Хорошее
Чернозем слитой				
Залежь	AУ, 5–16	28.3	71.5	Неуд.
	AУv, 16–43	44.1	55.7	Хорошее
	BCAv, 60–80	34	59.5	Неуд.
	PU, 5–20	31.7	67.5	Неуд.
Пашня	AУv, 40–60	39.12	60.0	Хорошее
	BCAv, 60–80	34.8	62.7	Неуд.
Желтозем				
Дендрарий	AУ, 0–6	41	58.5	Хорошее
	BEЛ, 6–20	18.9	80.0	Неуд.
	BM, 20–60	15.7	79.0	Неуд.

Примечание. Неуд. – неудовлетворительная.

почвообразующие породы представлены тяжелыми майкопскими глинами [15].

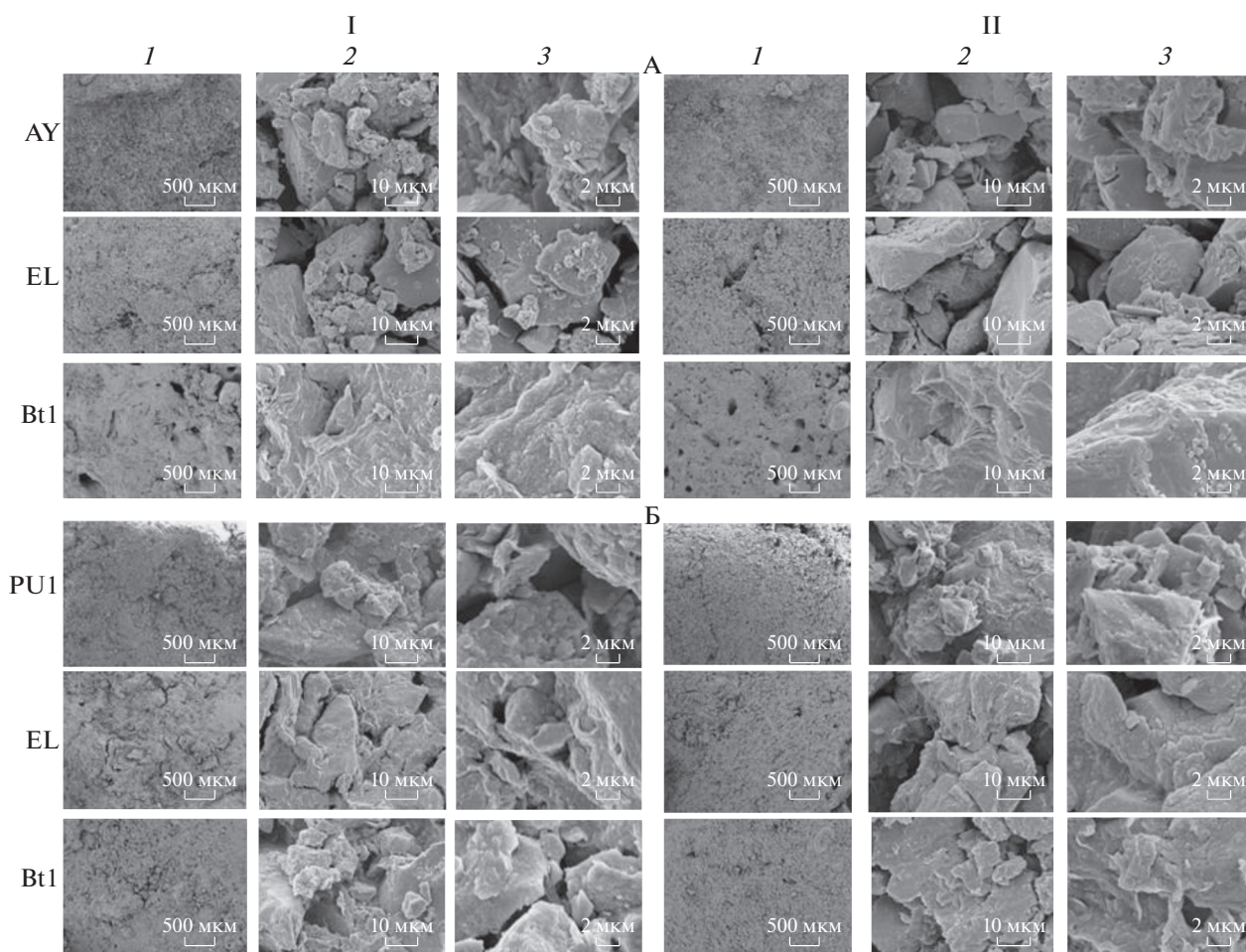
Агрегатный анализ показал, что для всех исследуемых почв фракция больше 10 мм была преобладающей, за исключение верхнего горизонта чернозема типичного под лесом. Для всех почв под лесом, независимо от генезиса, распределение агрегатов по размерам более равномерное, чем в пахотных почвах, что согласуется с данными Холодова [23], показавшим, что вовлечение почв в сельскохозяйственное использование увеличивает размер агрегатов.

Проведена оценка структуры почв по содержанию агрономически ценных агрегатов (табл. 2). Для дерново-подзолистых почв и желтозема характерна смена качества структуры вниз по профилю с хорошей до неудовлетворительной. В черноземах типичных наблюдается отличная структура всех горизонтов, за исключением нижних, где происходит переход в градацию хорошая. Выделяется чернозем слитой, в котором вне зависимости от типа землепользования структура является неудовлетворительной по всему профилю. Размер преобладающей фракции диапазона агрономически ценных агрегатов варьирует в зависи-

мости от генезиса почв и типа землепользования. Так, в верхних горизонтах дерново-подзолистой почвы под лесом преобладали агрегаты размером 5–7 и 7–10 мм, в горизонтах EL, BEЛ и BT – 1–2, 3–5 и 7–10 мм соответственно, а во всех горизонтах пахотной почвы – 5–7 и 7–10 мм. Для чернозема типичного под лесом в наибольшей степени представлена фракция 3–5 мм диапазона 10–0.25 мм, а в пахотной почве – 1–2 мм. В слитых черноземах и среди агрономически ценных агрегатов преобладают фракции размером 7–10 мм.

**Микроструктура.** Съемка поверхности и срезов агрегатов методом СЭМ показала, что микроструктура почв разного генезиса имеет свои особенности, заметные уже на небольших увеличениях ( $\times 500$ ). Различия между горизонтами профилей и специфика землепользования обнаруживаются при больших увеличениях, начиная с  $\times 2000$ .

В дерново-подзолистых почвах агрегаты верхних горизонтов имеют рыхлое внутреннее строение и включают визуально определяемые элементарные почвенные частицы (ЭПЧ), что отчетливо видно на сколах агрегатов (рис. 2). В профиле выделяются горизонты EL и BEЛ, их агрегаты еще более рыхлые, пористые и в значительной степе-



**Рис. 2.** Микростроение дерново-подзолистой почвы под лесной растительностью (А), под пашней (Б). Здесь и на рис. 3, 4: 1 – поверхности агрегатов, II – сколы агрегатов при увеличениях: 1 –  $\times 30$ , 2 –  $\times 2000$ , 3 –  $\times 7000$ .

ни состоят из мелких отмытых минеральных зерен, особенно заметных на больших увеличениях ( $\times 2000$  и  $\times 7000$ ), что соответствует классическим представлениям об оподзоленных горизонтах [7]. Структурные отдельности нижнего горизонта ВТ плотные, однородные, трещиноватые, присутствует эффект склеенности в однородную массу. Наибольшие различия между типами землепользования для дерново-подзолистых почв выявлены для верхних горизонтов. Агрегаты гумусово-аккумулятивного горизонта почвы под лесом включают большое количество мелких ЭПЧ, в то время как в пахотной почве представлены крупные микроагрегаты, образующие плотную структуру с меньшей пористостью. Для нижнего горизонта ВТ естественной почвы характерно обилие крупных пор, заметных при минимальном увеличении ( $\times 30$ ), и почти полное отсутствие тонких пор при большом увеличении ( $\times 7000$ ), в отличие от пахотной почвы с заметной пористостью при высоких увеличениях.

В верхних горизонтах чернозема типичного под лесом проявляется однородная связность и

слитность поверхности и скола агрегатов, а их поры представляют собой пустоты разной формы и размеров в однородной органо-минеральной массе. На увеличениях  $\times 2000$  выделяются отдельные ЭПЧ (рис. 3). В нижнем горизонте ВСАмс крупные поры менее выражены ( $\times 30$ ). В горизонте ВСАмс почвы под пашней при больших увеличениях ( $\times 2000$ ) наблюдаются крупные отмытые минеральные частицы, плотно сомкнутые с микроагрегатами.

Агрегаты слитого чернозема также плотно упакованы и склеены, а при увеличении  $\times 2000$  просматриваются единичные минеральные зерна (рис. 4). Только при увеличении  $\times 7000$  обнаруживается разница в верхних горизонтах – в пахотных почвах микроструктура агрегатов представлена плотно сомкнутыми микроагрегатами меньшего размера, чем в почвах под залежью.

Поверхность агрегатов желтозема отличается от скола крупными порами, заметными при малом увеличении ( $\times 30$ ), при среднем увеличении значимого различия не наблюдается – и поверхность, и скол имеют однородную плотную структуру без вы-



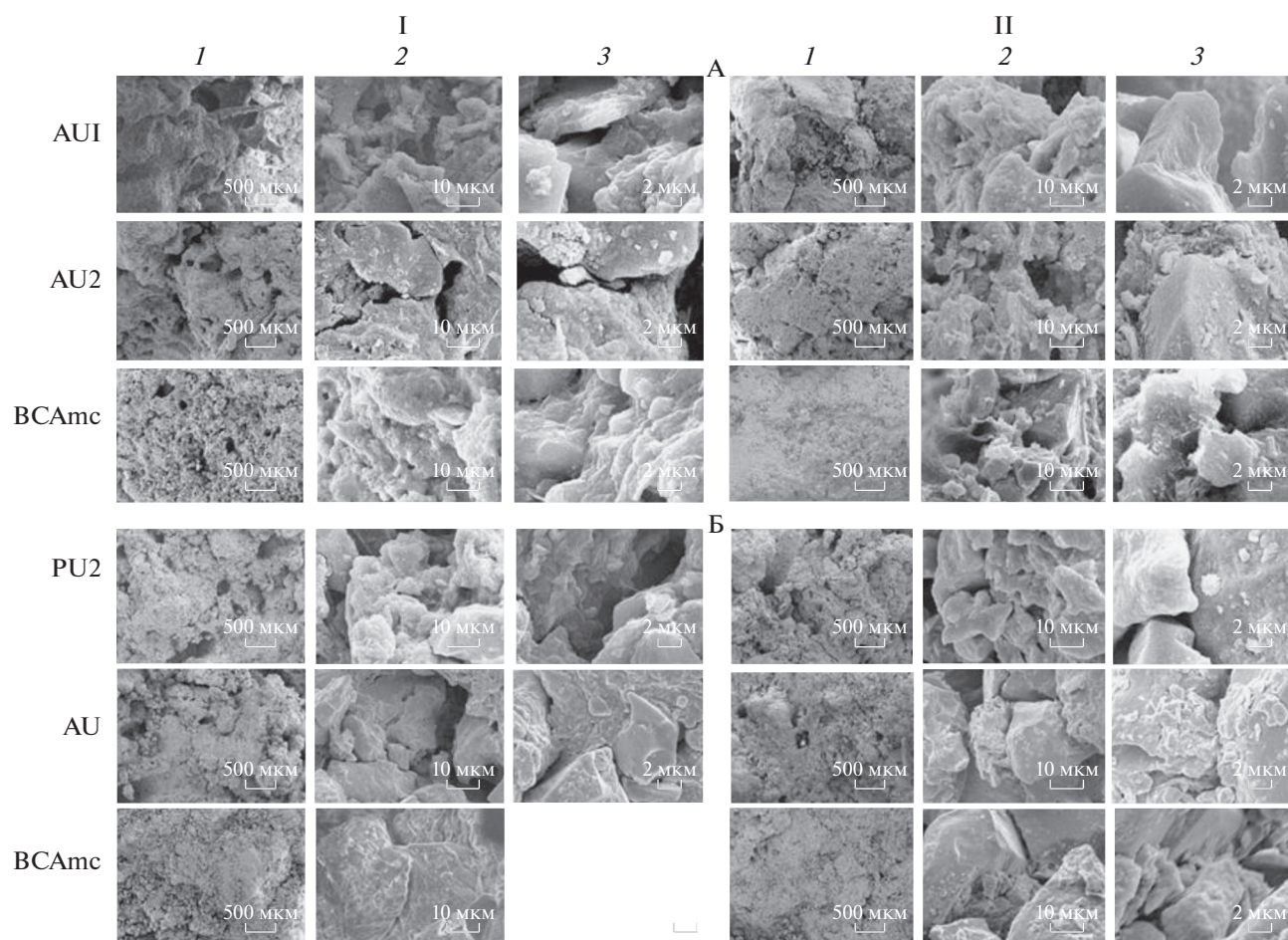


Рис. 3. Микростроение чернозема типичного под лесной растительностью (А), под пашней (Б).

деления отдельных ЭПЧ, и только при самых больших увеличениях обнаруживается сомкнутая микроагрегированность структурных отдельностей.

Отметим, что наиболее показательными для описания микроструктуры агрегатов дерново-подзолистых почв разного типа землепользования оказались сколы, показывающие различия их внутреннего микростроения. Горизонты черноземов и желтоземов не имеют столь выраженной разницы между поверхностью агрегата и его сколом. Вовлечение слитых черноземов в землепользование ведет к увеличению пористости агрегатов пахотного горизонта и заметной, при высоких увеличениях, микроструктурности, в отличие от черноземов типичных, в которых наблюдается более плотная упаковка агрегатов верхних слоев почв по сравнению с естественными почвами.

Особенности микростроения почвенных агрегатов нашли свое отражение в реологическом поведении почв (рис. 5). Реологические кривые прямого и обратного хода образуют петли, то есть одной и той же скорости сдвига соответствуют разные по величине напряжения сдвига. Известно, что кривая прямого хода фиксирует поведение почвы под на-

грузкой и характер разрушения ее структуры, кривая обратного хода дает представление о способности почвы восстанавливать структуру [14]. Если кривая обратного хода лежит выше кривой прямого хода, можно говорить о явлении реопексии (эта петля обусловлена увеличением прочности), а если ниже — о явлении тиксотропии. Доминирующая роль тех или иных реологических эффектов зависит от различных факторов, но, в первую очередь, от концентрации твердой фазы, типа межчастичных контактов и формы самих частиц [14]. Указанные свойства наиболее ярко проявляются при рассмотрении реологических характеристик исследованных почв по генетическим горизонтам.

В гумусовых горизонтах под естественной растительностью расположение реологических кривых прямого и обратного хода свидетельствует о проявлении тиксотропии, то есть при механическом воздействии происходит разрушение структуры, а затем, после прекращения воздействия, ее самопроизвольное восстановление в прежнее состояние [42]. Известно, что минеральные и органические коллоиды подавляют тиксотропию [15, 34], а частицы вытянутой формы увеличивают тиксо-

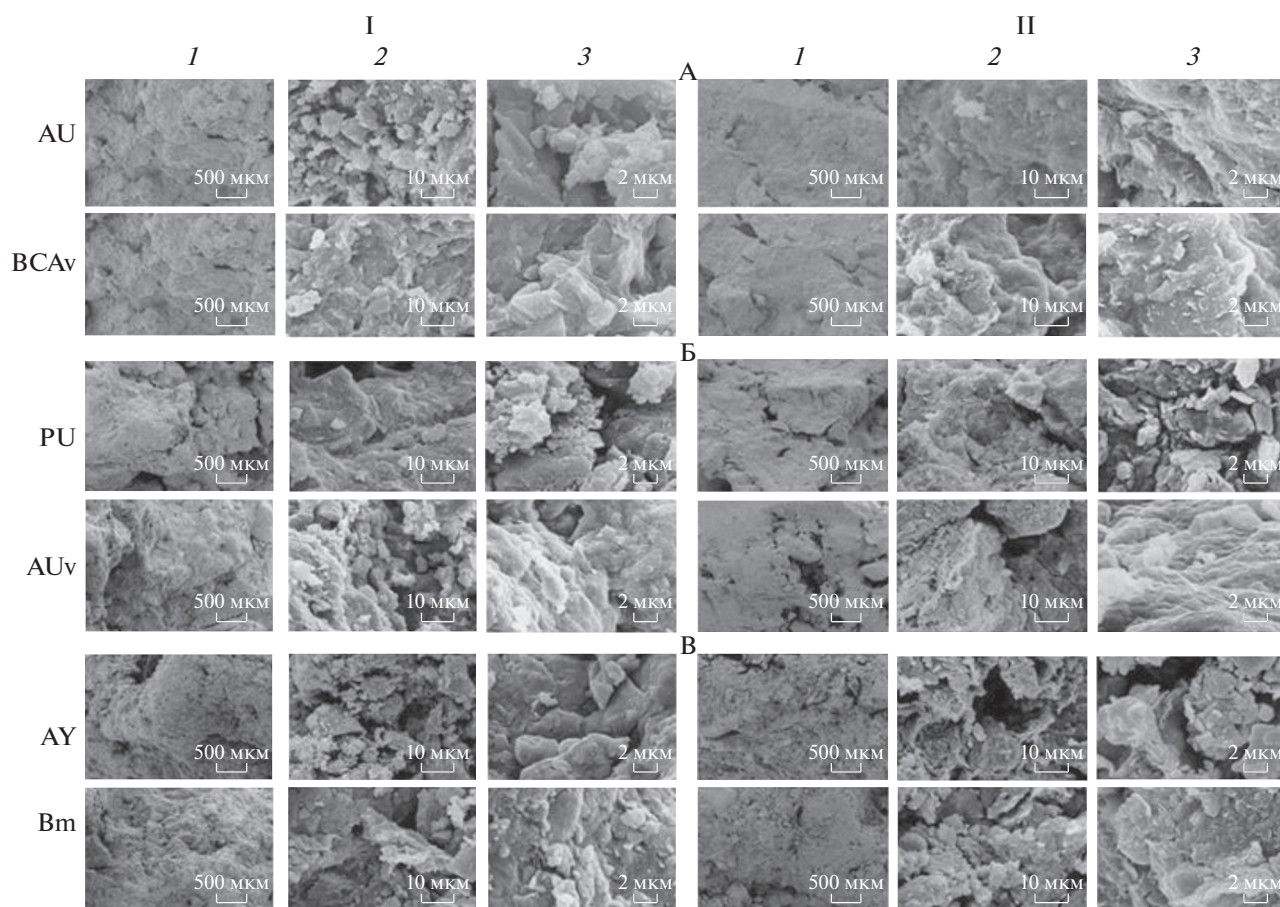


Рис. 4. Микростроение чернозема слитого под залежью (А), под пашней (Б) и желтозема (В).

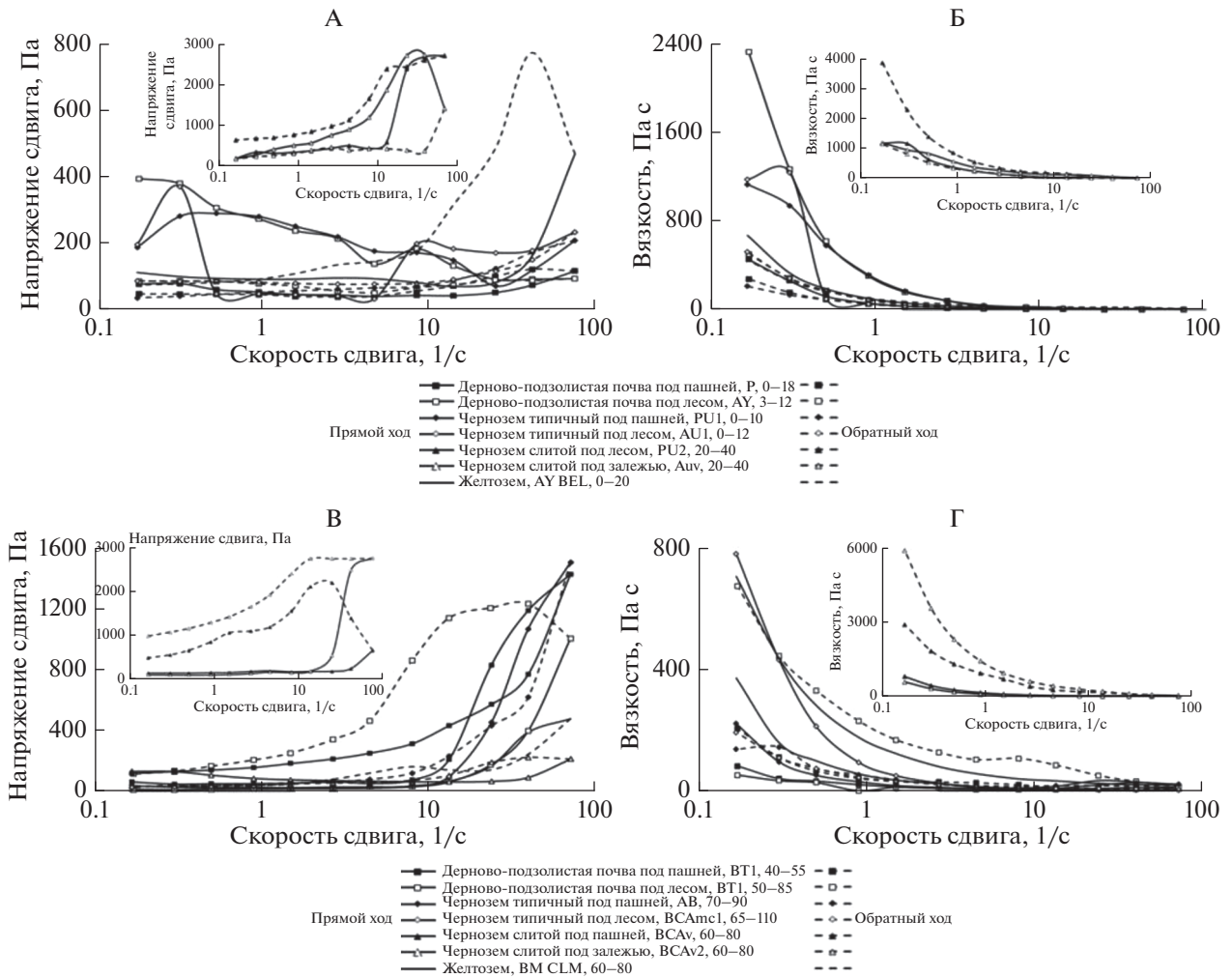
тропные свойства. Из-за создаваемого расклинивающего давления устойчивых гидратно-ионных слоев связь между почвенными частицами ослабляется [45]. Отметим, что понятие о тиксотропности почв связано с представлением о возникновении в почвах особого рода коагуляционной тиксотропной структуры, которая характеризуется образованием рыхлого каркаса из коллоидных и более крупных частиц, преимущественно удлиненной формы, внутри которого находится почвенный раствор [1]. Это согласуется с данными съемки почвенных агрегатов, выявившее их рыхлое сложение в гумусовых горизонтах дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного. С глубиной явление тиксотропии сменяется на реопексию. В горизонте ЕL дерново-подзолистой почвы, где присутствуют отмытые округлые минеральные зерна, явление тиксотропии ослабляется, и появляется реопексия. В агрегатах иллювиальных горизонтов с плотным однородным сложением с отсутствием мелких пор, также в большей степени проявляется реопексия. Причиной данного явления, согласно работе Абриковой [2], может быть преобладание в исследуемых почвах прочных конденсационно-кристаллизационных структурных связей внутри агрегатов.

В отличие от естественных почв, кривые образцов пахотных горизонтов дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного, демонстрируют явление реопексии, обусловленное более плотным сложением и меньшей пористостью агрегатов. На реологических кривых нижних горизонтов пахотных дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного петля реопексии переходит в петлю гистерезиса при уменьшении напряжения сдвига [30]. Это согласуется с исследованиями микроструктуры: на СЭМ-снимках агрегаты нижних горизонтов почв под пашней имеют более рыхлое сложение по сравнению с агрегатами почв под лесной растительностью, что может быть обусловлено образованием коагуляционной структуры.

В слитом черноземе наблюдается тиксотропия верхних горизонтов как пашни, так и залежи. Глубже по профилю уже отчетливо проявляется реопексия, при которой после снятия нагрузки напряжение сдвига и вязкость увеличиваются при обратном ходе.

Для нижних горизонтов исследуемых почв независимо от типа землепользования видна следующая картина: с глубиной проявление одного свойства сменяет другое. Так, например, если в желто-





**Рис. 5.** Реологические кривые: графики зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига (А, В), вязкости от скорости сдвига (Б, Г).

земе в верхних горизонтах наблюдались петли реоэксии, то с глубиной проявляются обратные петли гистерезиса — тиксотропии. Для нижних горизонтов лесных почв диапазон напряжений, при котором осуществляется сдвиговая нагрузка, в несколько раз больше, чем в пахотных.

Рассчитанные реологические параметры представлены в табл. 3. Выявлено, что “предел Шведова” ( $P_{к1}$ ), соответствующий началу деформационных процессов, ниже у образцов почв, находящихся в сельскохозяйственном использовании. Выделение нескольких пределов прочности ( $P_{к2}$ ) свидетельствует о ступенчатом разрушении структуры и падении эффективной вязкости, а, следовательно, об иерархической организации различных по своей прочности структурных связей в почве. На реологических кривых некоторых горизонтов дерново-подзолистой почвы и желтозема можно наблюдать несколько  $P_{к2}$ , но разница между этими пределами прочности минимальна. В черноземе типичном и

слитом можно выделить несколько пределов прочности ( $P_{к2}$ ), сильно отличающихся друг от друга по своей величине. Это свидетельствует о более сложной микроструктурной организации в этих почвах.

Предел пластично-вязкого разрушения структуры ( $P_m$ ) больше в почвах, не вовлеченных в сельскохозяйственное использование. Напряжение сдвига, соответствующее полному разрушению структуры слитых черноземов, в таблице не указано, так как значения вышли за рамки возможного определения на приборе. Это означает, что для разрушения структурных связей нужно приложить нагрузку больше, предусмотренного конструкцией прибора.

По величине отношения  $P_{к1}/P_{к2}$ , выражающего наличие дилатантных свойств, можно сделать вывод, что прочность образуемых связей максимальна в желтоземах и характеризуется тем, что при малой скорости деформации система ведет себя как жидкость, с увеличением скорости деформации сопротивление резко возрастает и становится почти неза-

Таблица 3. Реологические параметры исследуемых почв

Почва	Горизонт, глубина, см	Вязкость, Па*с			Прочность, Па			$P_{к1}/P_{к2}$	$P_m/P_{к1}$	Наблюдаемое реологическое поведение
		$\eta_{P_{к1}}$	$\eta_{кон}$	$\eta_{min}$	$P_{к1}$	$P_{к2}$	$P_m$			
Дерново-подзолистая под пашней	P, 0–18	455.0	276.4	2.1	77.4	35.0 32.5	51.3	2.2	0.7	Реопексия, тиксотропия
	EL, 36–40	86.7	230.7	4.4	14.7	15.0	20.0	1.0	1.4	Реопексия
	BT1, 50–60	80.9	205.2	4.7	13.8	17.0	21.4	0.8	1.6	Тиксотропия, реопексия
Дерново-подзолистая под лесной растительностью	AУ, 3–12	2329.5	502.9	2.2	396	60.0	87.6	6.6	0.2	Тиксотропия
	EL, 20–25	23.3	276.3	4.7	701.3	25.0 60.0	191.3	3.7	0.3	Тиксотропия, реопексия, тиксотропия
	BT1, 50–85	51.6	674.5	4.6	8.8	18.0	62.2	0.5	7.1	Реопексия
Чернозем типичный под пашней	PU1, 0–10	1132.1	212.8	3.0	188.7	316.5 180.5 7.5	119.9	0.6	0.6	Реопексия, тиксотропия
	AУ, 40–50	1116.6	220.8	2.2	186.1	295.6 150.0	89.2	0.6	0.5	Реопексия, тиксотропия
	AB, 70–90	221.7	136.6	7.2	37	22.5 27.6 20.4	97.9	1.6	2.6	Тиксотропия, реопексия
Чернозем типичный под лесной растительностью	AУ1, 0–12	1176.4	520.7	4.5	196.1	49.3 244.3	179.2	4.0	0.9	Тиксотропия, реопексия, тиксотропия
	AУ2, 12–35	1144.5	450.2	3.4	190.78	300.2 83.3	138.9	0.6	0.7	Тиксотропия
	BCAmc1, 65–110	782.1	192.5	2.2	130.4	75.1	90.1	1.7	0.7	Реопексия, тиксотропия
Чернозем слитой под пашней	PU2, 20–40	1201.3	3911.9	–	200.3	398.4 300.0 655.1	–	0.5	–	Тиксотропия, реопексия
	AУv, 40–60	2552.4	5083.8	–	425.5	481.6 353.2 453.4	–	0.9	–	Тиксотропия, реопексия
	BCAv, 60–80	971.6	3928.8	–	162.0	230.4 148.4 477.4	–	0.7	–	Реопексия
Чернозем слитой под залежью	Auv, 20–40	1213.3	1165.8	–	202.3	628.4 398.5 128.3	–	0.3	–	Тиксотропия
	BCAv1, 40–60	1160.9	9174.3	–	193.5	521.5 2701.4	–	0.4	–	Реопексия
	BCAv2, 60–80	1229.7	5465.7	–	205	409.9 2500.0	–	0.5	–	Реопексия
Желтозем	AУ, BEL, 0–20	668.6	447.4	4.1	111.5	84.0	164.3	1.3	1.5	Реопексия, тиксотропия
	BM, 20–40	176.1	456.5	3.6	29.4	19.5	147.0	1.5	5.0	Реопексия
	BM, 40–60	199.9	566.3	14.3	33.3	22.2 28.0	294.8	1.5	8.9	Реопексия

Таблица 3. Окончание

Почва	Горизонт, глубина, см	Вязкость, Па*с			Прочность, Па			$P_{к1}/P_{к2}$	$P_m/P_{к1}$	Наблюдаемое реологическое поведение
		$\eta_{P_{к1}}$	$\eta_{кон}$	$\eta_{min}$	$P_{к1}$	$P_{к2}$	$P_m$			
Желтозем	ВМ, 60–80	372.0	707.6	15.4	62	42.0 36.0 42.0	208	1.5	3.4	Тиксотропия, реопексия
	СЛМ, 80–100	221.7	136.6	7.2	37.0	24.0 20.0 25.0	97.9	1.5	2.6	Тиксотропия, реопексия

Примечание.  $\eta_{P_{к1}}$  – вязкость начала течения, наибольшая структурная вязкость ( $\gamma = 0.1667 \text{ с}^{-1}$ );  $\eta_{кон}$  – конечная эффективная вязкость образца, которая соответствует наименьшей скорости деформации ( $\gamma = 0.1667 \text{ с}^{-1}$ ) по обратной реологической кривой;  $\eta_{min}$  – минимальная структурная вязкость;  $P_{к1}$  – напряжение сдвига, соответствующее началу течения образца ( $\gamma = 0.1667 \text{ с}^{-1}$ );  $P_{к2}$  – динамический предел текучести, соответствует началу разрушения;  $P_m$  – напряжение сдвига, соответствующее полному разрушению структуры;  $P_{к1}/P_{к2}$  – характеристика прочности образуемых связей;  $P_m/P_{к1}$  – характеристика диапазона напряжений, при котором разрушается структура.

висимым от деформирующей силы, что отвечает поведению твердого тела [1]. Диапазон напряжений, при котором разрушается структура  $P_m/P_{к1}$ , среди исследованных почв наибольший в желтоземе. В горизонте ВМ (40–60 см) он достигает 8.9, что определенно указывает на неньютоновское поведение смеси, когда с увеличением напряжений сдвига в пастообразной суспензии с течением времени увеличивается ее вязкость. Этим также можно объяснить медленное структурообразование этих слоев при наличии небольших напряжений сдвига.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере естественных почв разного генезиса и почв, вовлеченных в сельскохозяйственное использование, исследованы их морфологические и микроструктурные характеристики и свойства.

Выяснено, что типы почвенной структуры и формы макроагрегатов исследованных почв обусловлены, прежде всего, особенностями процессов почвообразования. Тип землепользования влияет на размер структурных фракций: в пахотных вариантах дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного содержание глыбистой фракции практически по всему профилю оказалось больше, чем в аналогах с естественной растительностью. В слитых черноземах содержание глыбистой фракции во всех горизонтах еще больше и составляет более 50% независимо от типа землепользования.

Впервые проведены исследования микроструктуры поверхности агрегатов и их срезов (сколов) методом СЭМ, позволившие описать пространственную организацию почвенных агрегатов. Агрегаты исследованных горизонтов почв разного генезиса отличаются друг от друга микроструктурностью уже при малых увеличениях ( $\times 500$ ). Особенно отчетливо выделяются горизонты ЕЛ

дерново-подзолистой почвы отмытыми минеральными частицами, а ее нижние горизонты – наличием крупных пор и полостей при малых увеличениях и плотной склеенностью микроагрегатов при большем увеличении.

Тип землепользования оказывает наибольшее влияние на специфику микростроения почвенных агрегатов пахотных почв, в которых наблюдается более плотная упаковка и меньшая пористость по сравнению с естественными для дерново-подзолистой почвы и чернозема типичного. В слитом черноземе пахота увеличивает микроструктурность верхнего горизонта, обнаруживаемую только при больших увеличениях. Исследование реологического поведения почв показало, что в гумусовых горизонтах естественных почв в значительной степени выражены коагуляционные структуры. В верхних горизонтах пахотных почв преобладают конденсационно-кристаллизационные типы структурных связей, что может указывать на продолжающиеся процессы структурообразования. Исключение составляют чернозема слитые, в верхних горизонтах которых хорошо развита коагуляционная структура и преобладает тиксотропия, а в нижних – реопексия.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование микроструктуры почв проведено в центре коллективного пользования “Электронная микроскопия в науках о жизни” МГУ им. М.В. Ломоносова (УНУ “Трехмерная электронная микроскопия и спектроскопия”).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа осуществлена при финансовой поддержке грантов РФФИ: отбор образцов и исследование базовых свойств почв проведены по гранту 19-04-01298 А,

изучение микроструктуры и реологических свойств почв – по гранту 19-29-05252 мк. Подготовка аналитического обзора научной литературы выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрукова Л.П.* Кинетика процессов тиксотропного структурообразования в почвенных суспензиях // Почвоведение. 1970. № 3. С. 50–57.
2. *Абрукова Л.П.* Реопексия при реологических исследованиях почв // Почвоведение. 1976. № 5. С. 121–126.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Воронин А.Д.* Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
5. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
6. *Девтерова Н.И.* Риски снижения урожайности сельскохозяйственных культур по агрохимическим показателям на основных типах почв территории Адыгеи // Новые технологии. ФГБНУ Адыгейский НИИСХ. 2015. № 1. С. 12–128.
7. *Зайдельман Ф.Р.* Гидрологический режим почв нечерноземной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 329 с.
8. *Захаров С.А.* Курс почвоведения. М.–Л., 1927. 444 с.
9. *Карпачевский Л.О.* Экологическое почвоведение. М.: ГЕОС, 2005. 336 с.
10. *Качинский Н.А.* Структура почвы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963. 100 с.
11. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
12. *Кузнецова И.В.* Изменения физического состояния черноземов типичных и выщелоченных Курской области за 40 лет // Почвоведение. 2013. № 4. С. 434–441. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13040084>
13. *Мак-Виккар М.Х., Мак-Виккар Дж.С.* Практическое руководство по улучшению пастбищ. М.: Колос, 1965. 239 с.
14. *Малкин А.Я., Исаев А.И.* Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. С. 557.
15. *Мамсиров Н.И.* Оптимизация системы обработки почв как фактор повышения их плодородия и продуктивности пропашных культур в условиях южно-предгорной зоны Западного Предкавказья. Дис. ... д. с.-х. н. Владикавказ, 2016. 357 с.
16. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: Академический проект, 2004. 432 с.
17. *Скворцова Е.Б., Санжарова С.И.* Микроморфометрические особенности порового пространства в пахотных горизонтах суглинистых почв // Почвоведение. 2007. № 4. С. 487–497.
18. *Скворцова Е.Б., Шейн Е.В., Романенко К.А., Абросимов К.Н.* Формирование пузырьковых пор в агрегатах из элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2020. № 7. С. 840–849. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2007014X>
19. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шейна, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
20. *Филиппова О.И., Холодов В.А., Сафронова Н.А., Юдина А.В., Куликова Н.А.* Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов зонального ряда почв европейской России // Почвоведение. 2019. № 3. С. 335–347. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031>
21. *Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шейн Е.В., Милановский Е.Ю.* Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном земледельческом использовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080049>
22. *Хан К.Ю., Поздняков А.И., Сон Б.К.* Строение и устойчивость почвенных агрегатов. // Почвоведение. 2007. № 4. С. 450–456.
23. *Холодов В.А.* Механизмы восстановления структуры и органического вещества гумусовых горизонтов почв на разных уровнях иерархической организации. Дис. ... д. с.-х. н. М., 2021. 241 с.
24. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р. и др.* Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях земледельческого использования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060>
25. *Цыбулька Н.Н., Тишук Л.А., Юхновец А.В.* Влияние основной обработки на агрофизические свойства эродированных сельскохозяйственных культур // Почвоведение. 2002. № 12. С. 1488–1494.
26. *Шишов Л.Л.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
27. *Шоба С.А., Герасимова М.И.* Структурно-организационный анализ и типы микростроения (микроморфотипы) в почвенно-генетических исследованиях // Почвоведение. 1990. № 9. С. 97–108.
28. *Alaoui A., Lipiec J., Gerke H.H.* A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective // Soil Tillage Res. 2011. V. 115–116. P. 1–15.
29. *Ambert-Sanchez M., Mickelson S.K., Ahmed S.I., Gray J.N., Webber D.F.* Evaluating soil tillage practices using X-ray computed tomography and conventional laboratory methods Trans // ASABE. 2016. V. 59. P. 455–463. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11308>
30. *Baver L.D.* A classification of soil structure and its relation to the main soil groups // Soil Sci. Soc. Am. J. 1934. P. 107–109. <https://doi.org/10.2136/sssaj1934.036159950B1520010032x>
31. *Bronnikova M.A., Sedov S.N., Targulian V.O.* Clay, iron-clay, and humus-clay coatings in the eluvial part of soddy-podzolic soils profile // Eurasian Soil Science. 2000. V. 33(6). P. 577–584.
32. *Gerke H.H., Kohne J.M.* Estimating hydraulic properties of soil Aggregate skins from sorptivity and water retention // Soil Sci. Soc. Am. J. 2002. V. 66. P. 26–36.
33. *Horn R., Smucker A.* Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils // Soil Tillage Res. 2005. V. 82(1). P. 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.002>

34. *Johannes A., Weisskopf P., Schulin R., Boivin P.* To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? // *Soil Tillage Res.* 2017. V. 173. P. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>
35. *Kemper W.D., Rosenau R.C.* Aggregate stability and size distribution. methods of soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9, 2nd edition. ASA, Madison, WI, 1986. P. 425–442.
36. *Kubiens W.L.* Zur Mikromorphologie, Systematik und Entwicklung der rezenten und fossilen Lössböden // *E&G—Quaternary Science J.* 1956.
37. *Lal R., Shukla M.K.* Principles of soil physics. Marcel Dekker Inc., NY, USA. 2004. P. 682. <https://doi.org/10.4324/9780203021231>
38. *Le Bissonnais Y.* Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Theory and methodology // *European J. Soil Science.* 2016. V. 67. P. 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
39. *Lucas M., Shulter S., Vogel H.-J., Vetterlein D.* Soil structure formation along an agricultural chronosequence // *Geoderma.* 2019. V. 350. P. 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.041>
40. *Markgraf W., Horn R.* Rheological investigations in soil micro mechanics: Measuring stiffness degradation and structural stability on a particle scale // *Progress in Management Engineering.* Nova Science Publishers, Hauppauge, N.Y., USA, 2009. P. 237–279.
41. *San José Martínez F., Muñoz Ortega F.J., Caniego Monreal F.J., Kravchenko A.N., Wang W.* Soil aggregate geometry: Measurements and morphology // *Geoderma.* 2015. V. 237–238. P. 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.003>
42. Soil Science Division Staff. Soil survey manual / Ed. C.E. Kellogg. USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C., 1937.
43. *Suslenkova M.M., Umarova A.B., Butylkina M.A.* Microstructure of soils of different genesis and its transformation in constructozems of Moscow // *Eurasian Soil Science.* 2018. V. 51. P. 1220–1228. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100125>
44. *Tobiasova E., Baranchikova G., Gomoryova E., Debska B., Banach-Szott M.* Humus substances and soil aggregates in the soils with different texture // *Soil and Water Research.* 2017. P. 1–7. <https://doi.org/10.17221/31/2017-SWR>
45. *Wang X.Y., Zhao Y., Horn R.* Soil Wettability as Affected by Soil Characteristics and Land Use // *Pedosphere.* 2010. V. 20(1). P. 43–54. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-76-123>
46. *Wei Gao, Shao Xie, Pan.* Soil Aggregate and its Response to Land Management Practices // *China particuology.* 2006. V. 4(5). P. 211–219.
47. *Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Ploeg R.R. Van Der, Bachmann J.* Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management // *Eur. J. Soil Sci.* 2005. V. 56(2). P. 239–251.
48. *Umarova A.B., Suslenkova M. M., Butylkina M. A. et al.* Hydrosorption and microstructural characteristics of soil horizons of different genesis and their change in constructozems // *Eurasian Soil Science.* 2019. V. 52(11). P. 1369–1377. <https://doi.org/10.1134/S1064229319110127>

## Aggregate Structure of Native and Arable Soils of Different Genesis: Morphological and Rheological Characteristics

A. B. Umarova<sup>1,\*</sup>, M. A. Butylkina<sup>1</sup>, M. M. Suslenkova<sup>1</sup>, M. S. Aleksandrova<sup>2</sup>,  
Z. S. Ejelev<sup>1</sup>, M. V. Khmeleva<sup>1</sup>, A. K. Shkhapatsev<sup>3</sup>, and A. I. Gasina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>2</sup>Academician Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, 107258 Russia

<sup>3</sup>Maykop State Technological University, Maykop, 385000 Russia

\*e-mail: a.umarova@gmail.com

Aggregates and capillary-saturated pastes of loamy soddy-podzolic soils (Albic Glossic Retisols (Lomic, Cutanic)), typical and vertic chernozems (WRB – Haplic Chernozems (Loamic, Aric, Pachic)) and Vertisols), yellow soils (WRB – Nitisols) in their native state and agricultural use were studied by scanning electron microscopy (SEM) and on a Reotest-2 rotary viscometer with a coaxial cylindrical system. Aggregates of arable horizons in soddy-podzolic soil and typical chernozem have less pronounced porosity and a denser packing of their microaggregates in comparison with native soils. For vertic chernozems, an opposite pattern is observed – a fine aggregation of the arable layer is recorded at high magnifications, while in the agro-humus horizon, the section of the aggregate is dominated by a compact packing of its components. The rheological behavior of the soils revealed the predominance of condensation-crystallization structural bonds in the arable layers, which are replaced with depth by coagulation structures, with the exception of chernozems, which are very compact in the upper horizons where coagulation structure is well developed and thixotropy is manifested. The limit of plastic-viscous destruction of the structure is higher in soils that are not involved in agricultural use, and the “Shvedov limit” corresponding to the onset of deformation processes, on the contrary, is lower. All studied soil samples had several ultimate strengths, which indicates the hierarchical organization of the structure of soil aggregates.

**Keywords:** European part of the Russian Federation, sod-podzolic soils, chernozems, Albic Glossic Retisols (Loamic, Cutanic), Haplic Chernozems (Loamic, Aric, Pachic), Vertisols, Nitisols, structural organization, hierarchical microstructure, rheology, condensation and crystallization relations, SEM