

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ АГРЕГАТОВ ПОЧВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАГРУЗКАХ

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта в рамках ФЦП
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.».*

Устойчивость почв к деградационным процессам определяется тем, что изменения физического состояния являются одним из основных и наиболее распространенных видов трансформации почв и почвенного покрова. Для сравнения взяты черноземы, формирующиеся под лесополосой, посевами кукурузы и паром. Установлено, что изменяются их физико-механические свойства (механическая устойчивость агрегатов и механическая прочность почвенных паст), а также водоустойчивость. Выявлено изменение прочностных свойств почвенной структуры агрегатов размером 3–5 и 5–7 мм. На основании полученных результатов по изучению прочности и базовых физических свойств почв выполнен поиск корреляции прочностных характеристик агрегатов от соответствующих физико-химических свойств почв. Проведена сравнительная характеристика заявленных свойств почв в зависимости от нагрузки и ее вида.

Ключевые слова: черноземы; физические свойства; механическая прочность агрегатов.

Актуальность исследований. В условиях нарастающего антропогенного воздействия возникает необходимость принятия мер по охране почв и почвенного покрова для поддержания равновесия в связи с развитием деградационных процессов. Для оценки состояния почв используют, в том числе, такие почвенные показатели, как механическая прочность и водоустойчивость [1].

Сохранение оптимальной почвенной структуры является существенным для непрерывного функционирования почв и экосистем в целом. В основе влияния органического вещества на формирование структуры лежат динамические взаимодействия различных форм органического вещества. При этом важно не только его наличие, но и биологические и химические модификации [2].

При изучении физических основ водостойкости почвенных агрегатов соотносят влияние биологических продуктов на их образование с устойчивостью этих биохимических соединений к биодеградации и обработке почвы. Последний вопрос важен для прогнозирования долговременного благоприятного эффекта от применения таких методов обработки, которые способствуют формированию водостойких агрегатов.

Взаимодействия элементарных почвенных частиц с биологическими продуктами, способствующими их скреплению, относятся к двум уровням. Органика может служить «клеем», который цементирует минеральный каркас, а микробная биомасса, особенно грибной мицелий, может рассматриваться как ячеистая структура, в которой частицы почвы улавливаются и формируют зернистую структуру.

Главной проблемой является сохранение и улучшение структуры при помощи сельскохозяйственных методов, которые препятствуют наблюдаемому в настоящее время уменьшению запасов органического вещества почвы.

Методы исследования. Определение прочности почвенных паст проводили методом измерения глубины погружения металлического конуса с углом раскрытия 30° в почвенную пасту за 5 с при заданных влажности и нагрузке (0,15 кг) на ручном пенетрометре [3].

Механическая прочность почвенных агрегатов измерялась с помощью метода П.А. Ребиндера,

разработанного для конического пластометра, для исследования механических свойств пластично-вязких дисперсных систем, к которым относится и почва [4].

Агрегатный состав почвы определялся двумя основными методами просеивания на ситах: воздушное сухое просеивание и мокрое просеивание в стоячей воде. Поскольку одним из недостатков классической процедуры ситового анализа является отсутствие стандартизации физического воздействия на образец [4], были использованы электрические вибрационные установки (Виброгрохот AS200 control), которые позволяют стандартизировать условия просеивания и минимизировать вклад личности исследователя на результаты анализа.

Определение гранулометрического состава почв проводилось на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц «Analysette 22 comfort». Предварительно образцы почв были подвергнуты диспергации с применением пирогената натрия и последующим механическим воздействием (интенсивное растирание почвенной пасты, применение ультразвука). Полученные данные гранулометрического состава представлены в виде таблиц, а также дифференциальной и интегральной кривых [5]. Специфичность определения данного параметра почв отмечалась и другими авторами [6].

Для определения водоустойчивости по Андрианову были взяты агрегаты размера 3–5 и 5–7 мм в естественном состоянии после определения агрегатного состава по Саввинову. При использовании данного метода общий период наблюдений составил 10 мин. При последнем отсчете, т.е. в десятую минуту наблюдения, учитывалось количество полностью распавшихся и полураспавшихся агрегатов.

На основе полученных результатов сухого и мокрого просеивания рассчитывались следующие показатели: содержание агрономически ценных агрегатов, %; коэффициент структурности, $K_{стр}$; суммарное количество агрегатов > 0,25 мм при мокром просеивании, %; агрономически ценная структура (по Долгову и Бахтину); критерий водопрочности агрегатов – критерий АФИ.

Общее содержание органического вещества измерялось на газовом анализаторе методом сухого сжигания в потоке кислорода. Для этого были взяты образцы,

в естественном состоянии и отмытые водой до исчезновения характерной окраски, которые затем растирались для получения фракций < 0,25 мм.

Объекты исследования. Исследования черноземов проводились на территории опытной станции на гра-

нице Воронежской и Курской областей. В дальнейшем объекты будем именовать: под лесом (разрез 1), под паром (разрез 2), под кукурузой (разрез 3); схемы расположения и наборы почвенных горизонтов в разрезах представлены на рис. 1.

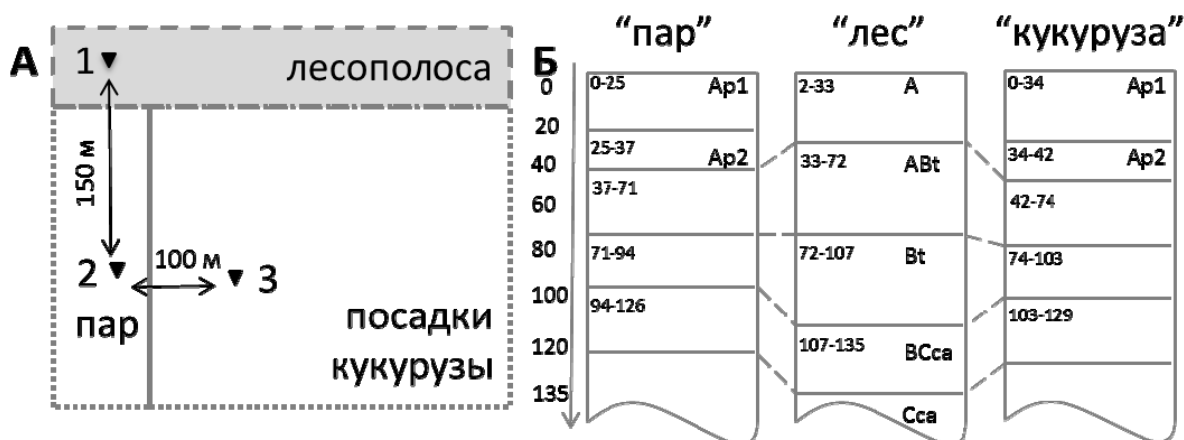


Рис. 1. Объекты исследования: А – схема расположения почвенных разрезов (1–3); Б – набор и мощность почвенных горизонтов, см

Разрез 1 находится в лесной полосе 60-летнего возраста. Лесообразующие породы: дуб, ясень, клен, в подросте – клен: чернозем слабовыщелоченный, среднегумусный, среднemosный, среднесуглинистый на карбонатном лессовидном суглинке (верхний горизонт сильно трансформирован под влиянием древесной растительности). Гумусовый горизонт темно-серый, среднесуглинистый, мелкоореховатый, ниже структура укрупняется, сверху слабо уплотнен, ниже уплотнен.

Разрез 2 заложен на поле, находящемся под паром после весеннего боронования (защитная полоса между монокультурой и полем севооборота шириной 12 м): чернозем выщелоченный, среднегумусный, среднemosный, среднесуглинистый, на лессовидном карбонатном суглинке. Пахотный горизонт темно-серый, среднесуглинистый, в верхней части пылевато-зернисто-комковатый, в нижней – призмовидно-комковатый с хорошо выраженными границами и ребрами структурных отдельностей. Нижележащий гумусовый горизонт темно-серый с хорошо выраженным буроватым оттенком, среднесуглинистый, зернисто-комковатый со слабо выраженной зернистой фракцией; менее уплотнен, чем вышележащий горизонт.

Разрез 3 заложен на посевах монокультурой кукурузы: чернозем выщелоченный, среднегумусный, среднemosный, среднесуглинистый на лессовидном карбонатном суглинке. Верхний пахотный горизонт темно-серый, среднесуглинистый, в верхней половине – глыбисто-комковатый, в нижней – крупно-комковатый. Сверху рыхлый, в глыбах уплотнен, в нижней части уплотнен. Нижележащий гумусовый горизонт темно-серый с буроватым оттенком, среднесуглинистый, комковато-зернистый.

При морфологическом описании почвенных профилей отмечается отличие структуры пахотных горизонтов. Если под лесом структура от классической для черноземов зернисто-комковатой трансформировалась в мелкоореховатую, то в пахотных почвах и под паром структура комковатая, но с признаками глыбистости;

кроме того, отмечается уплотнение верхних горизонтов почв под паром и кукурузой по сравнению с разрезом под лесом.

Результаты исследования. Исходя из результатов исследования агрегатного состава, которые представлены на профильных диаграммах распределения агрегатного состава (рис. 2), следует, что у почв под кукурузой и паром значительное преобладание крупных фракций, в отличие от чернозема под лесополосой.

Для дальнейшей оценки значимости агрегатного состава были рассчитаны следующие коэффициенты, представленные в табл. 1. Структура почв характеризуется как хорошая по содержанию агрономически ценных агрегатов и коэффициенту структурности, формирующихся под кукурузой и лесополосой. И только у чернозема под паром структура характеризуется как удовлетворительная для глубин 10–20 и 50–60 см.

Из табл. 1 следует, что водоустойчивость всех объектов по классификации Н.А. Качинского характеризуется как удовлетворительная и недостаточно удовлетворительная. По полученным результатам черноземы под кукурузой и паром относятся к группе неводоустойчивых почв, а под лесом – к водоустойчивым.

Для оценки значимости агрегатного состава черноземов использовался критерий агрономически ценной структуры (по Долгову и Бахтину), по которому они для глубин 0–40 см под кукурузой и паром относятся к группе почв с плохой структурой, а под лесополосой – к неудовлетворительной.

По критерию АФИ водопрочность почв под кукурузой относится к удовлетворительной, а под паром различается по всем глубинам от неудовлетворительной до хорошей. Водопрочность же чернозема под лесополосой в верхних глубинах относится к хорошей.

По данным гранулометрического состава все три почвы практически не отличаются. Этот факт объясняется тем, что формируются они на одной материнской породе – лессовидном карбонатном суглинке.

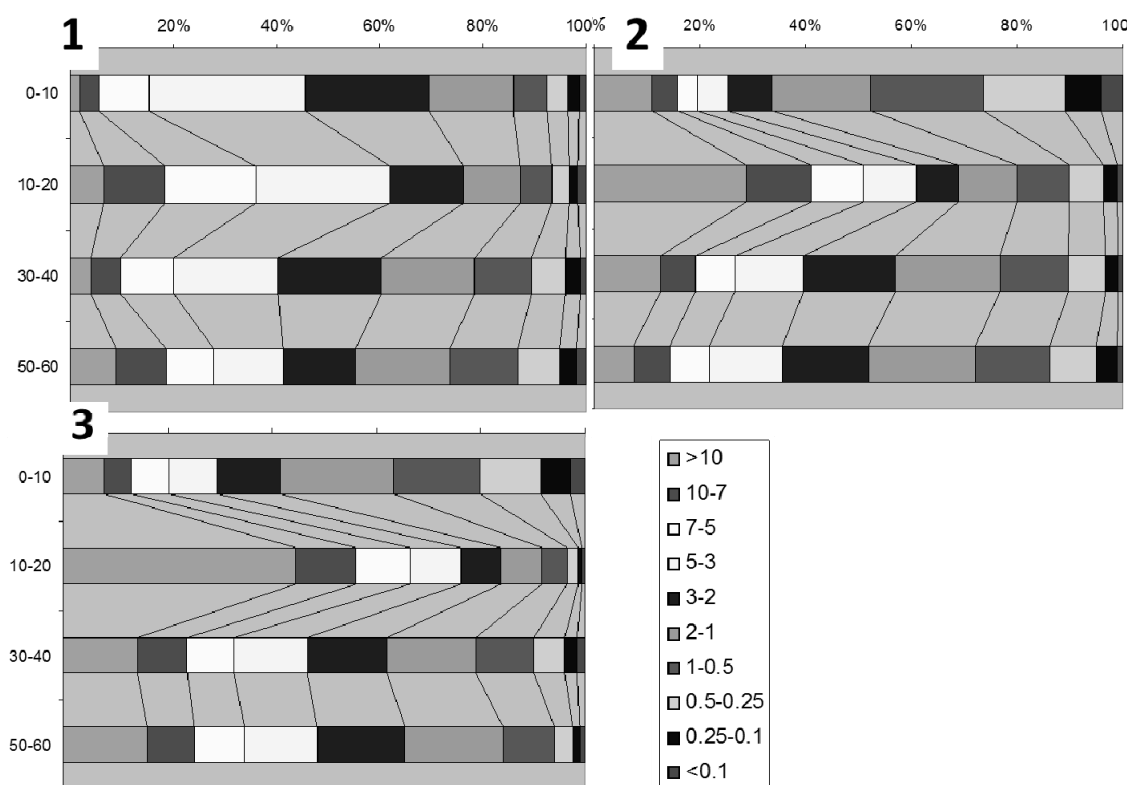


Рис. 2. Профильные диаграммы почв (глубина, см) распределения агрегатного состава (по сухому просеиванию, %; диаметр частиц, мм): под лесополосой (объект 1), под паром (объект 2), под кукурузой (объект 3)

Таблица 1

Оценочные градации состояния почв по агрегатному составу (сухое и мокрое просеивание по Саввинову)

Объект	Горизонт	Глубина, см	АЦА	К _{стр}	> 0,25 мм (мокрое просеивание)	АЦС (по Долгову и Бахтину)	АФИ
Кукуруза	Апах1	0–10	78,1 хорошее	3,6 хорошее	19,2 неудовл-ное	78,1/19,2 плохое	51,4 удовл-ное
	Апах1	10–20	67,5 хорошее	2,1 хорошее	18,6 неудовл-ное	67,5/18,6 плохое	111,8 хорошее
	Апах2	30–40	84,1 хорошее	5,3 хорошее	19,0 неудовл-ное	84,1/19,0 плохое	92,0 удовл-ное
	AB	50–60	87,6 хорошее	7,1 хорошее	15,0 неудовл-ное	87,6/15,0 плохое	62,9 удовл-ное
Пар	Апах1	0–10	83,6 хорошее	5,1 хорошее	14,2 неудовл-ное	83,6/14,2 плохое	49,1 неудовл-ное
	Апах1	10–20	54 удовл-ное	1,2 удовл-ное	14,0 неудовл-ное	54,0/14, плохая	202,9 хорошее
	Апах/пер	30–40	81,9 хорошее	4,5 хорошее	13,6 неудовл-ное	81,9/13,6 плохая	76,9 удовл-ное
	AB	50–60	81,5 хорошее	4,4 удовл-ное	15,4 неудовл-ное	81,5/15,4 плохое	110,4 хорошее
Лесополоса	A	0–10	94,8 хорошее	18,2 хорошее	39,2 удовл-ное	94,8/39,2 неудовл-ное	182,9 хорошее
	A	10–20	90,4 хорошее	9,4 хорошее	24,8 недостаточно удовл-ное	90,4/24,8 неудовл-ное	185,4 хорошее
	AB	30–40	92,2 хорошее	11,8 хорошее	20,4 недостаточно удовл-ное	92,2/20,4 неудовл-ное	110,2 хорошее
	AB	50–60	86,0 хорошее	6,1 хорошее	19,4 недостаточно удовл-ное	86,0/19,4 плохое	87,3 удовл-ное

Примечание. АЦА – агрономически ценные агрегаты; К_{стр} – коэффициент структурности; АЦС – агрономически ценная структура.

Количественную характеристику межчастичных взаимодействий при различных границах Аттерберга можно получить, измеряя способность почвенной пасты оказывать сопротивление расклиниванию металли-

ческого конуса. Зависимости сопротивления расклиниванию от влажности исследуемых объектов представлены на рис. 3, где фиксируется с уменьшением влажности закономерное его увеличение.

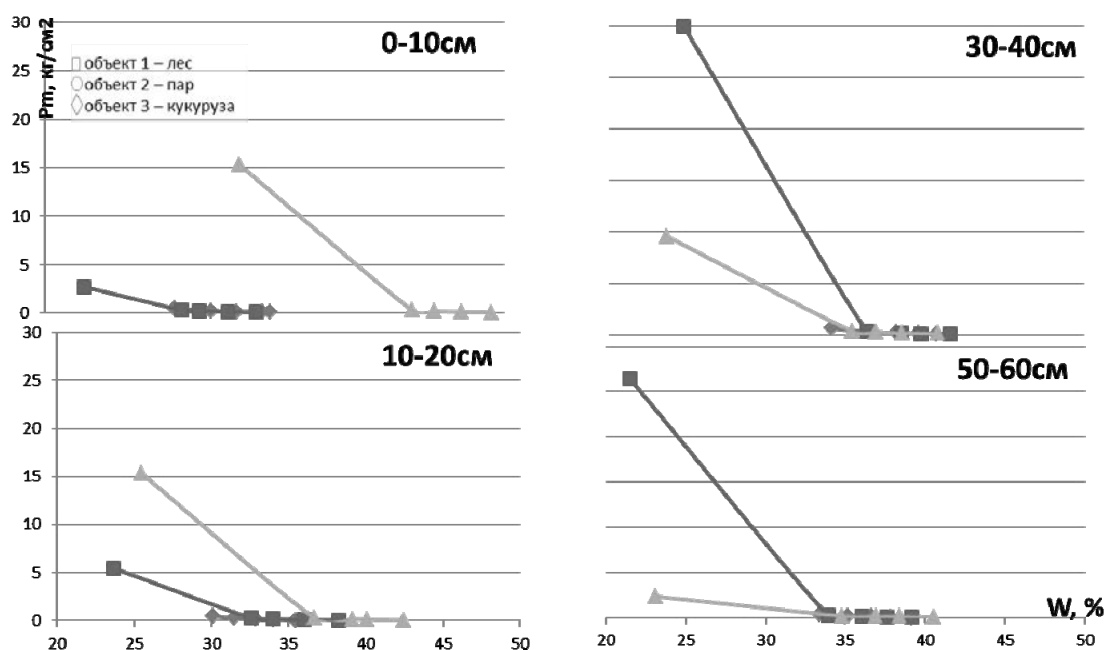


Рис. 3. Графическое отражение зависимости сопротивления расклиниванию от влажности

Здесь же отмечается то, что прочность почвенных образцов под лесом уменьшается с глубиной, а под кукурузой и паром наблюдается обратная зависимость. Это объясняется тем, что в почве под лесом присутствует значительно больше органического вещества, которое выполняет функцию клея, в том числе и в межчастичных взаимодействиях.

Аппроксимация зависимости сопротивления расклиниванию от влажности проводилась в пакете STATISTICA, позволяющем находить не только коэффициенты (параметры аппроксимации), но и осуществлять их оценку по достоверности, и для этого было использовано уравнение

$$P_m = (W / b_1) - b_2,$$

где P_m – сопротивление расклиниванию, кг/см²; W – влажность почвенной пасты, %; b_1 , b_2 – параметры аппроксимации.

Указанная зависимость оказалась наилучшей в сравнении с другими нелинейными убывающими функциями: для одного и того же массива данных параметры аппроксимации этой функцией были достоверны и отсутствовали систематические ошибки. Кроме того, параметры b_1 и b_2 имеют физический смысл: чем больше величина b_1 , тем выше лежит график в плоскости, т.е. расклинивание больше при одной и той же влажности.

Этот параметр можно назвать «устойчивостью» к механическим воздействиям. Параметр b_2 : чем он больше по абсолютному значению, тем круче и ниже кривая зависимости сопротивления расклиниванию от влажности, и этот параметр можно назвать «подверженностью» агрегатов к механическим воздействиям.

С учетом параметров аппроксимации и их статистических критериев (в частности, средние квадратические ошибки, S_b) было проведено по полученным параметрам сравнение исследованных объектов, а для параметров аппроксимации (b_n и $b_{n''}$) разных выборок рассчитан t -критерий по следующей формуле:

$$t = |b_n' - b_{n''}| / \sqrt{(S_{bn'})^2 + (S_{bn''})^2},$$

где $S_{bn'}$ и $S_{bn''}$ – стандартные отклонения параметров b_n и $b_{n''}$.

Соответственно, при значении t -критерия выше табличного для данной степени свободы и уровня значимости ($\alpha = 0,05$) параметры двух выборок значительно отличаются друг от друга, при этом можно утверждать о достоверности различий получаемых экспериментальных характеристик (табл. 2).

Одним из важнейших составляющих механической устойчивости является сопротивление расклиниванию, данные по которому в виде механической устойчивости агрегатов представлены в табл. 3

Таблица 2

Параметры аппроксимации зависимости сопротивления расклиниванию почвенной пасты b_1 и b_2 с указанием достоверности различий параметров

Глубина отбора образцов, см	Параметры аппроксимации и оценки	Кукуруза		Пар		Лесополоса	
		Значения параметра	p-level ($\alpha = 0,05$)	Значения параметра	p-level ($\alpha = 0,05$)	Значения параметра	p-level ($\alpha = 0,05$)
0–10	b_1	26,0455*	0,0005	25,2150*	0,0003	39,9580*	0,0000
10–20	b_1	27,8341*	0,0005	28,3737*	0,0003	32,9531*	0,0000
30–40	b_1	32,5204*	0,0011	32,6774*	0,0001	30,9419*	0,0006
0–10	b_2	8,7621*	0,0109	8,6788*	0,0109	13,6535*	0,0013
10–20	b_2	10,2829*	0,0227	9,2674*	0,0120	10,5512*	0,0021
30–40	b_2	11,1729*	0,0479	12,1578*	0,0056	8,3025*	0,0209

* Параметры достоверно отличаются от нуля.

Механическая устойчивость агрегатов (Рm)

Рm, кг/см ²	Кукуруза				
	Глубина, см	3–5 мм	W, %	5–7 мм	W, %
	0–10	0,402	3,25	0,196	3,31
	10–20	0,303	3,27	0,281	3,21
	30–40	0,347	3,25	0,147	4,67
	50–60	0,385	3,79	0,262	3,98
Рm, кг/см ²	Пар				
	Глубина, см	3–5мм	W, %	5–7 мм	W, %
	0–10	0,215	3,33	0,144	3,16
	10–20	0,283	3,03	0,275	3,30
	30–40	0,292	2,15	0,152	2,92
	50–60	0,418	2,37	0,193	2,96
Рm, кг/см ²	Лесополоса				
	Глубина, см	3–5мм	W, %	5–7 мм	W, %
	0–10	0,781	3,99	0,450	3,94
	10–20	0,495	3,62	0,438	4,02
	30–40	0,380	3,43	0,186	3,54
	50–60	0,490	3,38	0,271	3,13

На основе полученных данных установлено, что более высокой механической устойчивостью агрегатов обладает почва под лесополосой (0,4–0,8 кг/см²), средней механической устойчивостью – под кукурузой (0,3–0,4 кг/см²), а наиболее низкой – под паром (0,2–0,3 кг/см²). Если рассматривать механическую устойчивость для агрегатов разного размера, то агрегаты диаметром меньше 3–5 мм отличаются более высоким показателем по сравнению с агрегатами большего размера – 5–7 мм.

Значительное изменение структурного состояния водоустойчивости агрегатов прослеживается при сравнении черноземов выщелоченных, находящихся под

лесом по сравнению с почвами, используемыми в сельском хозяйстве – под монокультурой кукурузы. Для одних и тех же объектов, но для агрегатов меньшего размера интегральная зависимость количества распавшихся агрегатов лежит ниже, т.е. агрегаты размером 3–5 мм имеют большую водоустойчивость, чем агрегаты 5–7 мм. Если же рассмотреть эту зависимость для разных объектов, то наименьшей водоустойчивостью обладают агрегаты, находящиеся под монокультурой кукурузы, чуть выше – под паром, и наиболее высокой водоустойчивостью обладают агрегаты, находящиеся под лесополосой (рис. 4).

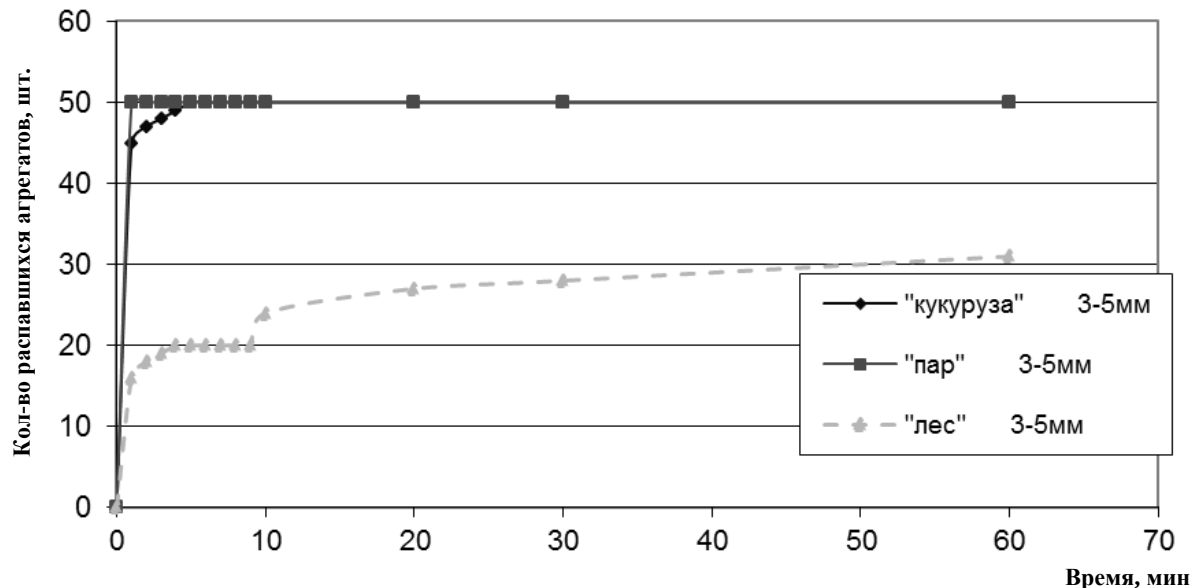


Рис. 4. Водоустойчивость для агрегатов размером 3–5 мм для разных объектов

По интегральным кривым водоустойчивости были рассчитаны параметры: n_1 отражает суммарное количество распавшихся агрегатов во времени, а n_2 – скорость распада. Наивысшая водоустойчивость по параметру n_1 наблюдается у черноземов под лесополосой, где распадается от 19 до 34 агрегатов, под паром – 43–49 агрегатов, под кукурузой – 48–49 агрегатов. Соответственно, n_2 под лесополосой – 0,2–0,5, под паром – 1,5–3,8, а под кукурузой – 33–40.

Такое распределение значений механической прочности и водоустойчивости можно описать с позиций количественного содержания органического вещества как основного материала, склеивающего почвенные частицы. Общее его содержание в черноземах выщелоченных различно и колеблется, закономерно уменьшаясь вниз по профилю. Наибольшие величины отмечаются под лесополосой и достигают 4%, а под кукурузой и паром сравнительно одинаковые значения, кото-

рые варьируют около 3%. Повышенные значения $C_{орг}$ под лесополосой объясняются значительным количеством поступающего растительного опада в почву, что способствует более интенсивному возврату органики в почву и усилению биологического круговорота.

По фундаментальным физическим характеристикам (твердая фаза, гранулометрический и агрегатный состав) исследуемые почвы отличаются друг от друга не существенно. Однако более высокой механической устойчивостью агрегатов обладают черноземы также под лесополосой, средней – под кукурузой и наименее низкой – под паром, что вызвано воздействием тяжелой техники и ежегодной сельскохозяйственной обработки, приводящей к ослаблению прочностных характеристик почвы. Кроме

того, агрегаты под лесополосой отличаются наибольшей водоустойчивостью, а к менее устойчивым можно отнести почвенные агрегаты под паром и еще ниже – под кукурузой. Для всех почв агрегаты меньшего размера 3–5 мм отличаются более высокой механической устойчивостью по сравнению с агрегатами большего размера 5–7 мм. Высокой механической прочностью почвенной пасты обладает чернозем под паром, далее по убыванию – под лесополосой, и наименьшей обладают почвы под кукурузой. На основе полученных данных следует, что все почвы, испытывающие различную сельскохозяйственную нагрузку, соответствующим образом реагируют на внешнее воздействие, проявляющееся в изменении физических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сергеев Е.М.* Грунтоведение. М. : Изд-во МГУ, 1973. 429 с.
2. *Тейт Р.П.* Органическое вещество почвы: Биологические и экологические аспекты : пер. с англ. М. : Мир, 1991. 400 с.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М. : Агропромиздат, 1973. 416 с.
4. *Теории и методы физики почв* / под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М. : Гриф и К, 2007. 616 с.
5. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М. : Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
6. *Кулижский С.П., Коронатова Н.Г., Артымук С.Ю. и др.* Сравнение методов седиментометрии и лазерной дифрактометрии при определении гранулометрического состава почв естественных и техногенных ландшафтов // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 4. С. 21–32.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 24 ноября 2012 г.