

- Eghball, B., Mielke, L. N., Calvo, G. A., Wilhelm, W. W., 1993. Fractal description of soil fragmentation for various tillage methods and crop sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 1337–1341.
- Gumbs, F. A., Warkentin, B. P., 1976. Bulk density, saturation water content, and rate of wetting of soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 28–33.
- Lin, S., 1971. Porosity and pore-size distribution of soil aggregates. Bulletin 29. WRRRC, Minneapolis, MN, 32 pp.
- Mandelbrot, B. B. 1982. *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman, San Francisco.
- Onoda, G. Y., Toner, J., 1986. Fractal dimensions of model particle packings having multiple generations of agglomerates. *J. Am. Ceram.* 69, C278–C279.
- Park, E. J., Smucker A. J. M. 2010. Saturated hydraulic conductivity and porosity within macroaggregates modified by tillage // *Soil Science Society of America Journal*. 2005. 69(1):38–45.
- Perfect, E., Blevins, R.L. 1997. Fractal characterization of soil aggregation and fragmentation as influenced by tillage treatment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 896–900.
- Perfect, E., Diraz-Zorita, M., Grove, J. H., 2002. A prefractal model for predicting size fragment mass-size distributions. *Soil Till. Res.* 64, 79–90.
- Perfect, E., and B. D. Kay. 1991. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1552–1558.
- Perfect, E., Rasiah, and B. D. Kay. 1992. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1407–1409.
- Rieu, M., Sposito, G., 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1231–1238.
- Rieu, M., Sposito, G., 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: II. Applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1239–1244.
- Voorhees, W. B., Allmaras, R. R., Larson, W. E., 1966. Porosity of surface soil aggregates at various moisture contents. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30, 163–167.
- Wittmus H. D. and Mazurak A. P., 1958. Physical and chemical properties of soil aggregates in a Brunizem soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 22, 1–5.
- Young, I. M., Crawford, J. W., 1991. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation. *J. Soil Sci.* 42, 187–192.

УДК 631.41

**ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ И ПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
ВОДОРАСТВОРИМОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДЕРНОВО-  
ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ  
ОКУЛЬТУРЕННОСТИ**

**Л. В. Бойцова, Е. Г. Зинчук**

*ГНУ Агротехнический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14  
E-mail: larisa30.05@mail.ru*

*Поступила в редакцию 04 февраля 2014 г., принята к печати 07 марта 2014 г.*

Изучена динамика содержания водорастворимого органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве слабой, средней и хорошей степени окультуренности в течение вегетационного периода. Исследовано профильное распределение водорастворимой фракции органического вещества в почвах со слабой и хорошей степенью окультуренности. Продемонстрировано увеличение абсолютного содержания водорастворимого органического вещества с увеличением степени окультуренности почв. Установлено уменьшение относительного содержания водорастворимого органического вещества в почве с увеличением степени ее окультуренности, что свидетельствует о переходе органического вещества в более стабильное состояние к окончанию вегетационного периода.

**Ключевые слова:** дерново-подзолистая супесчаная почва, почвенный профиль, водорастворимое органическое вещество, степень окультуренности.

## ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество почвы является фактором, определяющим биопродуктивность агроэкосистем. Органическое вещество в почве может находиться в лабильном или инертном состоянии. К лабильному, или активному, органическому веществу почв относятся фракция водорастворимого органического вещества, а также его легкая фракция и ряд других фракций, выделяемых при помощи различных экстрагентов (Семенов и др., 2010; Christensen, 2001; Gregorich et al., 2006; Six et al., 2002). Для сельскохозяйственного производства предпочтительно наличие в почве лабильного органического вещества, высвобождающего питательные элементы в достаточных для растений количествах (Janzen, 2006). С другой стороны, с целью снижения эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу желательнее, чтобы органическое вещество почвы было стабильным, а вновь поступающее органическое вещество быстрее стабилизировалось, переходя в инертное состояние и обеспечивая секвестрацию углерода, что является важным фактором, связанным с изменением климата.

Фракция водорастворимого органического вещества почвы представлена частицами < 0,45 мкм в виде простых (аминокислоты, моносахара) и более сложных (аминосахара, фенолы, фульвокислоты, гуминовые кислоты) соединений (Семенов и др., 2009). Водорастворимое органическое вещество играет важную роль в функционировании наземных экосистем. В частности, установлена его значимость для формирования химического состава почв и их развития (Kaiser et al. 2001), переноса питательных элементов, а также как субстрата для почвенной микрофлоры и растительности (Schulz, 1997). Содержание водорастворимого углерода (C<sub>вод</sub>) является одним из основных показателей биологической доступности органического вещества почвы, что обусловлено его легкой миграцией, стабилизацией и способностью к минерализации. Предполагается, что 19–50% всего почвенного углерода проходило через растворимую фракцию

(Qualls, 2005). До сих пор нет единого мнения о причинах, вызывающих сезонную динамику водорастворимого органического вещества почвы. Одни авторы объясняют ее динамикой разложения растительных остатков и процессами минерализации собственно гумусовых веществ (Александрова, 1965), другие считают ее результатом корневых прижизненных выделений растений. На зависимость содержания в почве водорастворимого органического вещества от гидротермических условий года и вида возделываемой культуры обращено внимание в работе А. В. Дедова и др. (2005). В ней установлено, что содержание водорастворимого органического вещества было выше под сахарной свеклой, чем под озимой пшеницей, а в нормальные по гидротермическим условиям годы содержание водорастворимого органического вещества в почве было большим, чем в избыточно влажные и прохладные.

Цель данного исследования состояла в изучении динамики содержания общего органического вещества и водорастворимого органического вещества в органогенном горизонте почвы, а также профильного распределения водорастворимого органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлась дерново-подзолистая супесчаная почва с разной степенью агрохимической и физической окультуренности. Исследования проводились на агрофизическом стационаре Меньковского филиала ГНУ АФИ Россельхозакадемии (Гатчинский район, Ленинградская область). Подстилающими породами для всех почв стационара являются красноцветные моренные отложения, в почвенном покрове распространены мелкие контуры с разной степенью глееватости, обусловленные особенностью микрорельефа и залеганием водоупорного горизонта на разной глубине (Моисеев и др., 2013). Глубина пахотного слоя составляет 22–23 см. Обследованы почвы со слабой (участок 1), средней (уча-

сток 2) и хорошей (участок 3) степенью окультуренности. В 2003–2005 гг. в почвы было внесено 0; 320 и 520 т навоза на гектар соответственно. В 2006 г. участки были разбиты на варианты: контроль – без минеральных удобрений (К), вариант N50 и вариант N70. В стационаре был заложен овощной севооборот, в котором в 2011 г. выращивались многолетние травы 2-го года пользования (клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) с тимфеевкой луговой (*Timothy-grass* L.) (Оленченко и др., 2012). В течение вегетационного сезона (май-август) один раз в месяц из пахотного горизонта почв отбирались смешанные образцы. Кроме того, в сентябре были также отобраны образцы из разных горизонтов почвенных профилей. Почвенные разрезы были заложены на почвах контрольных вариантов со слабой и хорошей степенью окультуренности.

По данным метеостанции Меньковского филиала ГНУ АФИ, сумма осадков с мая по август 2011 г. составила 486 мм, а средне-суточная температура воздуха – 16,7°C.

В образцах почв было определено содержание общего органического углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) по методу Тюрина (Аринушкина, 1969) и содержание водорастворимого углерода ( $C_{\text{вод}}$ ) по методу Э. Шульца, М. Кершенса (Шульц, Кершенс 1998). Также была проведена статистическая обработка результатов с использованием программы MS Excel, оценена достоверность различий средних с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение динамики содержания  $C_{\text{вод}}$  в органогенном горизонте почвы показало, что на участке 1 в вариантах К и N50 его содержание в течение вегетационного сезона менялось незначительно и оставалось на уровне 0,6–0,7 г·кг<sup>-1</sup> почвы, тогда как в варианте N70 к концу вегетационного сезона было обнаружено увеличение содержания  $C_{\text{вод}}$  в два раза по сравнению с началом наблюдений (рис.). На участке 2 и 3 к окончанию периода наблюдений было установлено достоверное ( $p < 0,001$ ) уменьшение

содержания  $C_{\text{вод}}$  во всех вариантах опыта. Наблюдалось снижение содержания  $C_{\text{вод}}$  с 0,8–1,5 до 0,4–0,6 г·кг<sup>-1</sup> почвы на участке 2 и с 1,4–1,9 до 0,4–0,6 г·кг<sup>-1</sup> почвы – на участке 3. Это, вероятно, можно объяснить более интенсивным развитием растительного покрова на почвах участков 2 и 3 и, следовательно, более высоким расходом  $C_{\text{вод}}$  на питание растений и микроорганизмов, а также более высокой эмиссией углекислого газа. Более высокое исходное содержание  $C_{\text{вод}}$  на участках 2 и 3, по сравнению с участком 1, объясняется внесением навоза крупного рогатого скота перед закладкой опыта. Использование навоза приводит как к увеличению общего органического вещества, так и способствует возрастанию содержания лабильного органического вещества почвы (Зинчук, Бойцова, 2012; Бойцова и др. 2012). Органогенный горизонт почвы участка 1 характеризовался наименьшим содержанием  $C_{\text{вод}}$  в среднем за сезон; при этом наблюдалось уменьшение средних значений  $C_{\text{вод}}$  в почвах данного участка по мере увеличения дозы минерального азота. В почвах участков 2 и 3 содержание  $C_{\text{вод}}$  снизилось к окончанию периода наблюдений. При этом минимальными значениями характеризовалась хорошо окультуренная почва с максимальной дозой минеральных удобрений, что можно объяснить недостатком углерода для питания микроорганизмов при избытке доступного азота из минеральных удобрений (Бойцова, Пухальский, 2013), а также азота, поступающего в почву за счет симбиотической деятельности клубеньковых бактерий клевера лугового. Микроорганизмы начинают удовлетворять свои потребности в углероде в первую очередь за счет наиболее доступного источника углерода, которым является водорастворимое органическое вещество почв. Водорастворимое органическое вещество служит «затравочным» материалом для процессов минерализации и гумификации органического вещества (Цыбулько, 2010). В течение вегетационного сезона наблюдается снижение количества водорастворимого органического

вещества в почвах с минеральными удобрениями.

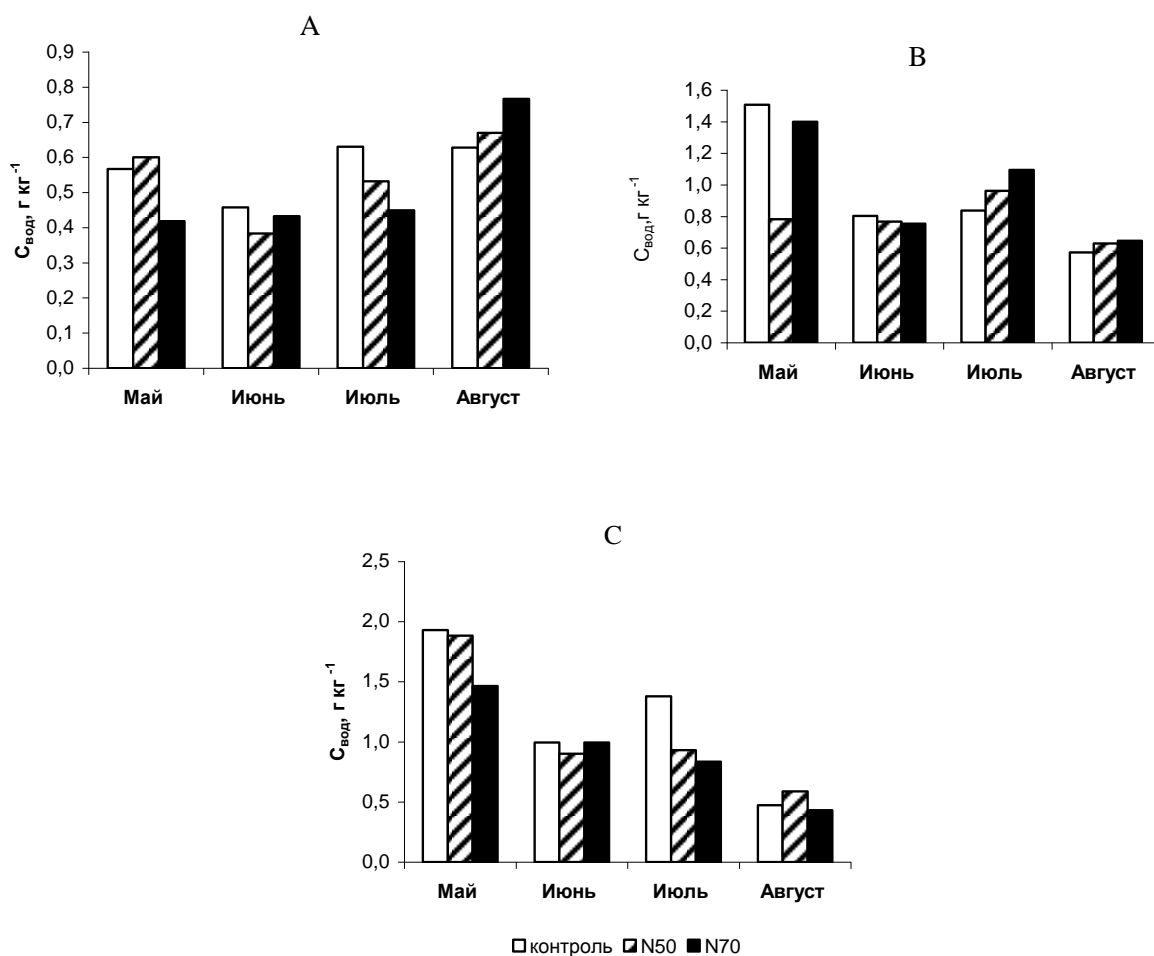


Рис. Динамика содержания водорастворимого органического вещества в органогенном горизонте дерново-подзолистой супесчаной почвы разной окультуренности.

А – слабая окультуренность; В – средняя окультуренность; С – хорошая окультуренность. Варианты опыта: контроль; N50 – доза азота 50 кг·га<sup>-1</sup>; N70 – доза азота 70 кг·га<sup>-1</sup>.

Исследования показали, что среднее содержание  $C_{\text{общ}}$  за весь период наблюдений было достоверно меньшим ( $p < 0,01$ ) в органогенном горизонте почв на участке 1 по сравнению с почвами участков 2 и 3, что связано с внесением в последние высоких доз навоза (табл. 1).

Как наиболее лабильная часть органического вещества почвы, водорастворимое органическое вещество служит источником биогенных элементов, углекислого газа, ферментов для возделываемых культур. Необходимо знать не только абсолютные значения содержания в почве водорастворимого органического вещества, но и его долю в общем органическом углероде, то есть его относительное содержание. Зная относи-

тельное содержание водорастворимого органического вещества почвы, можно судить об обеспеченности растений элементами питания, а также о стабильности органического вещества почвы. По оценочной шкале, предложенной Д. С. Орловым с соавторами (2004), исследуемые почвы характеризуются очень высоким относительным содержанием  $C_{\text{вод}}$  в среднем за сезон, которое составляет 3–4% от  $C_{\text{общ}}$ . В то же время в первой половине сезона наблюдается более высокое содержание водорастворимого органического вещества в почвах с более высокой степенью окультуренности, что свидетельствует о менее стабильном состоянии органического вещества в почвах участков 2 и 3 по сравнению с почвами участка 1. Так, диапазон зна-

чений  $C_{\text{вод}}/C_{\text{общ}}$  в мае – июне в органогенном горизонте почвы на участке 1 составлял 2,3–3,3%, на участке 2 – 2,94–3,85%, на участке 3 – 3,4–6,5%. К августу данный показатель снизился в почвах на участках 2 и 3 до 2,62–3,47 и 2–2,85% соответственно, а в почвах на участке 1 несколько увеличился до 2,8–3,8%. Органическое вещество почвы участков 2 и 3 достигло более стабильного состояния к концу вегетационного сезона. Направленность сезонных изменений содержания водорастворимого углерода почв всех изученных вариантов (за исключением контрольного варианта слабо окультуренного участка) соответствует направленности сезонных изменений содержания  $C_{\text{общ}}$ , что согласуется с литературными данными (Солодова, 1985).

Профильное распределение содержания углерода водорастворимой фракции органического вещества в почве имеет сходный характер с профильным распределением общего органического углерода. Его максимальное количество достигает того же показателя, что и  $C_{\text{общ}}$  в профиле почвы с хорошей окультуренностью (табл. 2). Причем на данных почвах, в отличие от почвы со слабой окультуренностью, за счет внесения высоких доз навоза крупного рогатого скота сформировался высоко гумусированный подпахотный горизонт  $A_1A_2$ . Наибольшее

количество  $C_{\text{вод}}$  для почв обоих участков сосредоточено в верхних гумусированных горизонтах, где развивается максимальное количество корней и, следовательно, поступает максимальное количество растительных остатков и корневых выделений, что способствует увеличению содержания  $C_{\text{вод}}$  (Александрова, 1965). При этом из горизонтов  $A_{\text{пах}}$  и  $A_1A_2$  было выделено в 2–5 раз больше  $C_{\text{вод}}$ , чем из горизонта  $A_2B$ . Наблюдается незначительная миграция  $C_{\text{вод}}$  вниз по профилю почв, что связано, вероятно, с высокой плотностью их сложения.

Доля  $C_{\text{вод}}$  в содержании общего углерода имеет различное распределение в исследуемых почвенных профилях и не совпадает с распределением содержания  $C_{\text{вод}}$ . В профиле хорошо окультуренной почвы соотношение  $C_{\text{вод}}/C_{\text{общ}}$  изменяется в диапазоне 0,5–2,8%, а в профиле слабо окультуренной – в диапазоне 2,7–21%. Установлено уменьшение относительного содержания водорастворимого органического вещества в почве по профилю с увеличением степени их окультуренности. Это свидетельствует о переходе органического вещества почвы с хорошей степенью окультуренности в более стабильное состояние к окончанию вегетационного периода.

**Таблица 1.** Динамика содержания общего органического углерода ( $\text{г } C_{\text{общ}} \cdot \text{кг}^{-1}$  почвы) в органогенном горизонте дерново-подзолистой почвы разной окультуренности

Окультуренность	Доза азота $\text{кг га}^{-1}$	Месяц			
		май	июнь	июль	август
слабая	0	17,20±0,6	18,61±0,12	15,19±0,05	22,72±0,09
	50	18,65±0,18	16,82±0,18	13,61±0,05	19,32±0,14
	70	16,26±0,1	14,19±0,01	14,75±0,05	19,94±0,05
средняя	0	25,45±0,03	26,67±0,03	24,49±0,05	21,87±0,05
	50	26,58±0,03	25,44±0,09	24,95±0,03	18,17±0,12
	70	26,18±0,38	25,79±0,04	28,27±0,03	18,61±0,00
хорошая	0	29,72±0,10	27,75±0,04	33,00±0,00	19,81±0,08
	50	29,42±0,18	26,72±0,14	25,77±0,04	20,93±0,00
	70	26,96±0,11	26,66±0,01	23,74±0,01	19,99±0,11

Данные для почвы со слабой и хорошей окультуренностью приведены из работы Бойцовой Л. В. и Пухальского Я. В. (2011).

**Таблица 2.** Содержание общего и водорастворимого органического вещества в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы

Горизонт	Глубина, см	$C_{\text{общ}}$ г·кг <sup>-1</sup> почвы	$C_{\text{вод}}$ г·кг <sup>-1</sup> почвы	$C_{\text{вод}}/C_{\text{общ}}$
Слабо окультуренная почва				
A <sub>пах</sub>	0–22	16,97±0,08	0,51	3,03
A <sub>2</sub> B	22–32	1,11±0,01	0,24	21,24
B <sub>1</sub>	32–57	1,78±0,03	0,12	6,90
B <sub>2</sub>	57–112	3,14±0,05	0,08	2,70
C	112–150	2,57±0,04	0,09	3,37
Хорошо окультуренная почва				
A <sub>пах</sub>	0–23	32,04±0,06	0,90	2,80
A <sub>1</sub> A <sub>2</sub>	23–33	31,98±0,11	0,68	2,12
A <sub>2</sub> B	33–50	11,36±0,18	0,18	1,62
B <sub>1</sub>	50–85	4,40±0,21	0,06	1,29
B <sub>2</sub>	85–138	9,32±0,03	0,10	1,04
C	138–168	7,16±0,04	0,04	0,51

Стандартное отклонение для значений  $C_{\text{вод}}$  составляет ±0,001–0,004.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением степени окультуренности в почве наблюдается увеличение содержания водорастворимого органического вещества. В почве со слабой степенью окультуренности установлено увеличение содержания  $C_{\text{общ}}$  и  $C_{\text{вод}}$  к концу вегетационного сезона. В почвах со средней и хорошей степенью окультуренности, напротив, наблюдается уменьшение  $C_{\text{общ}}$  и  $C_{\text{вод}}$ .

Уменьшение относительного содержания подвижных форм органического вещества в почвенных профилях с увеличением степени их окультуренности установлено в сентябре, что свидетельствует о переходе органического вещества почвы с хорошей степенью окультуренности в более стабильное состояние к окончанию вегетационного периода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Л. М. 1965. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука.
- Аринушкина Е. В. 1961. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ.
- Бойцова Л. В., Зинчук Е. Г., Пухальский Я. В. 2012. Сезонная динамика секвестрации органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве / Материалы докладов 6-го Съезда общества почвоведов им. В. В. Докучаева. Всероссийская с международным участием научная конференция «Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования». Петрозаводск – Москва, 13–18 августа 2012 года. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2012. Кн. 2. С. 159–160.
- Бойцова Л. В., Пухальский Я. В. 2013. Динамика содержания органического вещества, его лабильной и инертной частей в дерново-подзолистой супесчаной почве разной степени окультуренности // *Агрофизика* 3(11): 14-22.
- Дедов А. В., Придворцев Н. И., Верзилин В. В. 2004. Трансформация послеуборочных остатков и содержание водорастворимого гумуса в черноземе выщелоченном // *Агрохимия*. 2: 13-22.
- Зинчук Е. Г., Бойцова Л. В. 2012. Изменение содержания углерода водорастворимой фракции в дерново-подзолистой супесчаной почве разной окультуренности. «Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия». Сб. докладов научно-практической конференции Курского отд. МОО «Общество почвоведов им. В. В. Докучаева». Курск, ГНУ ВНИИЗ и ЗПЭ РАСХН. Курск, 3–5 декабря 2012. С. 46–48.
- Моисеев К. Г., Рижия Е. Я., Бойцова Л. В., Зинчук Е. Г., Гончаров В. Д. 2013. Корректировочные работы по крупномасштабному почвенному картографированию Меньковского филиала Агрофизического института Россельхозакадемии // *Агрофизика*. 1(9): 30-36.
- Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Розанова М. С. 2004. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // *Почвоведение*. 8: 918-926.
- Оленченко Е. А., Рижия Е. Я., Бучкина Н. П., Балашов Е. В. 2012. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // *Агрофизика*. 4(8): 8-18.
- Семенов В. М., Иванникова Л. В., Тулина А. С. 2009. Стабилизация органического вещества в почве // *Агрохимия*. 10: 77 – 96.
- Семенов В. М., Иванникова Л. В., Семенова Н. А., Ходжаева А. К., Удальцов С. Н. 2010. Минерализация органического вещества в разных по размеру агрегатных фракциях почвы // *Почвоведение*. 2: 157-165.
- Солодова Т. А. 1985. Сезонная динамика органических веществ в дерново-подзолистых почвах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. М. 17 с.
- Цыбулько Н. Н., Семенов В. М., Тулина А. С., Шапшеева Т. П., Жукова И. И. 2010. Структура и минерализуемость органического вещества дерново-подзолистых супесчаных и торфяных почв // *Экологический вестник*. 2(12): 17-25.
- Шульц Э., Кершенс М. 1998. Характеристика разлагаемой части органического вещества почв и ее трансформации при помощи экстракции горячей водой // *Почвоведение*. 7: 890 – 894.
- Christensen B. T. 2001. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 52: 345-353. Classification and diagnostic of soils USSR. 1977. Moskva, Kolos, 224.
- Gregorich E. G., Beare M. H., McKim U. F., Skjemstad J. O. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70. (3): 975-985.
- Janzen H. H. 2006. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biochem.*, 38 (3): 419-424.
- Kaiser K., Kaupenjohann M., Zech W. 2001. Sorption of dissolved organic carbon in soil: effects of soil sample storage, soil-to-solution ratio, and temperature. *Geoderma*. 99: 317-328.
- Qualls R. G., Bridgham S. D. 2005. Mineralization rate of <sup>14</sup>C – labeled dissolved organic matter from leaf litter in soils of a weathering chronosequence. *Soil. Biol. Biochem.* 37 (5): 905-916.
- Schulz E. 1997. Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) nach dem Grad ihrer Umsetzbarkeit und ihre Bedeutung für Nähr- und Schadstoffe. *Arch. Acker – Pfl. Bode.* Bd. 41: 465-484.
- Six J., Gonant R. T., Paul E.A., Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 241(2): 155-176.