Lagerwerff J. V. Lead, mercury and cadmium in environmental contaminants // Micronutrients in Agriculture. 1972. pp. 593–636.
Soil remediation and plant: Prospects and challenges. Ed.: K. Hakeem, M. Sabir, M. Ozturk, A. Mermut. Academic Press, 2014. 752 p.
Sorteberg A. The effect of some heavy metals on oats in pot experiments with three different soil types // Agricultural and Food Science, 1974, v. 46 (3), pp. 277–278.
Szymczak J., Grajeta H. Mercury contents in soil and plant material // Polish J. Food nutr. Science, 1992, v. 1, no. 2, pp. 31–39.
Tarradellas J., Bitton G. Chemical pollutants in soil. In: Soil ecotoxicology. Ed.: J. Tarradellas, G. Bitton, D. Rossel. Boca Raton: CRS Press, 1997, pp. 3–33.
Xu J., Kleja D. B., Biester H., Lagerkvist A., Kumpiene J. Influence of particle size distribution, organic carbon, pH and chlorides on washing of mercury contaminated soil // Chemosphere, 2014, v. 109, pp. 99–105.

УДК 631.434:631:95 DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.03

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА АГРОЭКОСИСТЕМ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ

С. И. Зинченко, И. М. Щукин

ФГБНУ «Верхневолжский федеральный аграрный научный центр»
601261, Владимирская обл., Суздальский р-н, п. Новый, ул. Центральная, 3
E-mail: zinchenkosergei@mail.ru

Поступила в редакцию 19 августа 2019 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

В агроэкосистемах на серой лесной и дерново-подзолистых почвах содержание агрономически ценных агрегатов и коэффициент структурности зависят от уровня антропогенного воздействия. Интенсивное механическое рыхление почвы в агроэкосистемах с помощью вспашки приводит к разрушению агрономически ценных агрегатов: коэффициент структурности серой лесной и дерново-подзолистой почв в слое 0–30 см снизился на 10–20% и 45% соответственно по сравнению с почвой, подвергавшейся безотвальной обработке. Коэффициент структурности серой лесной среднесуглинистой почвы увеличивается при усилении антропогенного воздействия за счет поступления в почву органических и минеральных удобрений. Высокими значениями коэффициента структурности характеризовались почвы, на которых применялась безотвальная обработка на глубину 20–22 см: в слое 0–20 см – 3,9, в слое 0–30 см – 4,9, что превышает значения данного показателя на залежном участке (2,4 и 2,1 в слоях 0–20 см и 0–30 см соответственно). В дерново-подзолистой супесчаной почве с экстенсивным способом использования содержание агрономически ценных агрегатов в слоях 0–20 см и 0–30 см уменьшилось на 14,7 и 17,0% ($НСР_{05}$ = 9,5 и 5,6%), а коэффициент структурности снизился до уровня хорошего агрегатного состояния по сравнению с почвой расположенного рядом лесного участка. Повышение уровня антропогенного воздействия от нормального до интенсивного органоминерального за счет применения минеральных и органических удобрений привело к увеличению коэффициента структурности до уровня отличного агрегатного состояния – 1,7–2,1. Повышение уровня антропогенного воздействия до высокоинтенсивного органоминерального за счёт увеличения дозы органического и минерального удобрений позволяет сохранить коэффициент структурности и количество агрономически ценных агрегатов в дерново-подзолистой супесчаной и легкосуглинистой почвах на уровне природных биоценозов.

Ключевые слова: структура почвы, Верхневолжский регион, дерново-подзолистая почва, серая лесная почва, обработка почвы, минеральные удобрения, органические удобрения.

ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE STRUCTURE OF SOIL COVER OF UPPER VOLGA REGION AGROECOSYSTEMS

S. I. Zinchenko, I. M. Schukin

Federal State Budget Scientific Institution «Upper Volga Federal Agrarian Research Center»
3, Tsentralnaya St., Novyi settlement, Suzdal district, Vladimir region, 601261
E-mail: zinchenkosergei@mail.ru

In agroecosystems based on gray forest and sod-podzolic soils, the content of agronomically valuable aggregates and the structural coefficient depended on the intensity of anthropogenic impact. Intensive mechanical loosening of the soil using plowing led to the destruction of agronomically valuable aggregates: the structural coefficient of gray forest and sod-podzolic soils in a layer of 0–30 cm decreased by 10–20% and 45%, respectively, compared to the soil subjected to subsurface tillage. The structural coefficient of gray forest medium loamy soil increased with increasing anthropogenic impact due to the application of organic and mineral fertilizers to the soil. Soils subjected to subsurface tillage to a depth of 20–22 cm were characterized by high values of the structural coefficient: 3.9 in the layer of 0–20 cm, 4.9 in the layer of 0–30 cm, which exceeded the values of this indicator on the layland site (2.4 and 2.1 in layers of 0–20 cm and 0–30 cm, respectively). In sod-podzolic sandy loam soil with an extensive management system, the content of agronomically valuable aggregates in layers of 0–20 cm and 0–30 cm decreased by 14.7 and 17.0%, respectively (Least Significant Difference$_{05}$ = 9.5 and 5.6%), and the structural coefficient also decreased to the level of good aggregate state compared to the soil of a nearby forest site. An increase in the level of anthropogenic impact from normal to intensive organomineral (due to the application of mineral and organic fertilizers) led to an increase in the structural coefficient to the level of an excellent aggregate state – 1.7–2.1. An increase in the level of anthropogenic impact to high-intensity organomineral due to an increase in the rates of organic and mineral fertilizers allowed maintaining the structural coefficient and the number of agronomically valuable aggregates in sod-podzolic sandy loam and light loamy soils at the level of natural biocenoses.

Keywords: soil structure, Upper Volga region, sod-podzolic soil, gray forest soil, soil tillage, mineral fertilizers, organic fertilizers.

ВВЕДЕНИЕ

Агроэкосистемы создаются человеком с целью получения урожаев возделываемых культур. Функционирование агроэкосистем предполагает наличие постоянной антропогенной нагрузки на составляющие их компоненты, которая может быть различной по интенсивности и продолжительности. Поэтому для предотвращения возможности необратимых изменений в агроэкосистеме важно предвидеть результаты антропогенных воздействий, а также знать предельно допустимые величины нагрузок и уровни устойчивости составляющих агроэкосистемы к природным и антропогенным нагрузкам (Карпачевский, 1987)

Важной особенностью экосистемы является способность поддерживать устойчивое динамическое равновесие в изменяющихся условиях среды. Агрогенная нагрузка на агроземы в первую очередь оказывает влияние на структуру почвы. Если воздействия приводят к деградации структуры пахотного и подпахотного горизонтов, то в дальнейшем, как следствие, происходят негативные изменения целого ряда агрофизических и гидрофизических характеристик почвы. Степень изменения природных свойств почвы определяется интенсивностью и типом агротехнического воздействия, его глубиной, длительностью, постоянством или прерывистостью во времени, типом макроклимата, климатом обрабатываемой почвы и, наконец, генетической природой естественной почвы (Зинченко и др., 2016).

Одной из важных характеристик, определяющих процессы, происходящие в агроэкосистеме, является структура почвы. От нее зависят многие физико-биологические процессы, протекающие в почве. Структурное состояние почвы в значительной степени зависит от механического состава, а также от содержания и состава гумуса, определяющих структуру почвы. Чем более оструктуренной является почва, тем меньше она уплотняется и нуждается в механическом рыхлении (Зинченко, 2006; Белоусов и др., 2018; Борин и др., 2018). Современная наука отводит важную роль структуре почвы и способам ее регулирования. Она рассматривается как фактор, который существенно влияет на условия роста растений, поскольку от него зависят плотность сложения почвы, ее водный и тепловой режимы, а также связанные с ними условия развития микробиологической деятельности и образование доступных для растений питательных веществ. Таким образом, при экологической оценке агроэкосистем весьма важным является изучение агрегатно-структурного состава почвы.

Цель работы заключалась в изучении влияния длительного антропогенного воздействия (приемы основной обработки, внесение удобрений) на структуру дерново-подзолистой и серой лесной почв Верхневолжья в рамках длительных стационарных полевых опытов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования по выявлению изменений структурного состояния почв проводились в 2012–2013 гг. на базе пяти полевых многолетних стационарных опытов Владимирского НИИСХ, Костромского НИИСХ, Всероссийского НИИ органических удобрений и Ивановской ГСХА.

Степень агротехнического воздействия в агроэкосистемах определялась уровнем применения органических и минеральных удобрений, а также интенсивностью механической обработки почвы.

Для оценки влияния антропогенного воздействия на почвы агроландшафтов использовались образцы почв ненарушенных природных экосистем.

Образцы почвы в изучаемых вариантах опыта отбирались в четырехкратной повторности через 10 см до глубины 30 см. Фракционирование почвы в воздушно-сухом состоянии проводилось по методу Н. И. Савинова (Водюнина, Корчагина, 1987). Коэффициент структурности определялся посредством расчета отношения массы комковато-зернистой фракции почвы (10–0,25 мм) к массе агрегатов размером более 10 мм и менее 0,25 мм. Полученные данные подвергались статистической обработке согласно методике В. А. Доспехова (Доспехов, 1985).

Во Владимирском НИИСХ исследования проводились в рамках двух опытов. В опыте 1 (исполнитель – к. с.-х. н. А. А. Григорьев) изучались агроэкосистемы, сформированные в течение 18 лет посредством внесения органических и минеральных удобрений на фоне ежегодной отвальной вспашки на глубину 20–22 см. Схема опыта включала следующие варианты с различными уровнями интенсивности: нулевой – навоз 6,7 т га$^{-1}$; интенсивный минеральный – $N_{45}P_{40}K_{40}$; высокоинтенсивный минеральный – $N_{65}P_{60}K_{60}$; высокоинтенсивный органоминеральный – $N_{71}P_{58}K_{58}$ + навоз 13 т га$^{-1}$.

В опыте 2 (исполнитель – д. с.-х. н. С. И. Зинченко) с 1986 г. проводились исследования различных типов механической обработки почв: 1 – механическая обработка отвальным плугом на глубину 20–22 см; 2 – безотвальная обработка на глубину 20–22 см; 3 – безотвальное рыхление на глубину 6–8 см. Поступление минеральных удобрений в количестве $N_{30}P_{30}K_{30}$ в среднем за год позволило сформировать нормальный уровень интенсивности (Иванов, 2001). Контрольным участком служил расположенный поблизости фитоценоз залежи, более 30 лет не подвергавшейся механической обработке. Почва опытных участков – серая лесная среднесуглинистая с содержанием гумуса 2,2–3,4%. Почвообразующая порода – покровные лессовидные тяжелые суглинки (карбонаты в 1 м отсутствуют). Мощность пахотного слоя – 25–30 см (Зинченко и др., 2016; Зинченко, 2019). Горизонт А в среднем составляет 30 см, характеризуется комковатой структурой и плотным сложением.

На базе Всероссийского НИИ органических удобрений (опыт 3, исполнитель – д. б. н. С. М. Лукин) во Владимирской области изучались агроэкосистемы, формирующиеся с 1968 г. под воздействием ежегодной отвальной вспашки на 20–22 см и применения органических и минеральных удобрений. Схема опыта включала варианты со следующими уровнями интенсивности: бессменный пар; без применения удобрений; нулевой – навоз 20 т га$^{-1}$; нормальный минеральный – $N_{50}P_{25}K_{60}$; нормальный органоминеральный – $N_{25}P_{12}K_{30}$ + навоз 5 т га$^{-1}$; высокоинтенсивный органоминеральный – $N_{100}P_{50}K_{120}$ + навоз 10 т га$^{-1}$. Почва опытного участка – дерново-сильноподзолистая супесчаная слабоглееватая, подстилаемая с 40–50 см моренным суглинком. Содержание гумуса – 1,05–1,17% (Лукин, 2009). В качестве контроля в опыте выступал расположенный поблизости участок леса.

На базе Ивановской ГСХА (опыт 4) исследовались агроэкосистемы, формирующиеся с 1986 г. посредством ежегодного внесения $N_{30}P_{60}K_{60}$ на двух фонах обработки почвы (исполнитель – к. с.-х. н. А. А. Борин). Почва опытного участка – дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая на средних суглинках, подстилаемых мореной. Мощность пахотного слоя – 20–22 см, содержание гумуса – 2,1% (Борин и др., 2018).

В Костромском НИИСХ (опыт 5) исследовались агроэкосистемы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, формирующиеся с 1978 г. под воздействием ежегодной отвальной вспашки на 20–22 см и применения минеральных удобрений и извести. Схема опыта включала следующие варианты с различными уровнями интенсивности: нормальный – $N_{32}P_{32}K_{32}$; интенсивный – 3 т га$^{-1}$ $CaCO_3$ (известь) + $N_{32}P_{32}K_{32}$; высокоинтенсивный – 25 т га$^{-1}$ $N_{96}P_{96}K_{96}$ (исполнитель – к. с.-х. н. О. П. Каменева). Почва опытного участка – дерново-подзолистая легкосуглинистая на мореном суглинке. Мощность пахотного слоя – 22–27 см, содержание гумуса – 1,39–1,54% (Вербицкая, 2004; Зинченко и др., 2017). В качестве контроля в опыте выступал расположенный поблизости участок экосистемы леса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В агроэкосистемах (опыт 2), сформированных на серой лесной среднесуглинистой почве, в течение 29 лет при применении одной дозы минеральных удобрений и использовании различных способов механической обработки коэффициент структурности агрогенных почв не уменьшился по сравнению с почвой залежного участка (табл. 1).

В агроэкосистемах он был ниже, но оставался на уровне отличного агрегатного состояния (Шеин, 2005), то есть находился в диапазоне 1,5–2,1. Более высокие показатели коэффициента структурности отмечены в агроэкосистеме с ежегодной безотвальной обработкой на глубину 20–22 см, где он был на том же уровне, что и на участке залежи (2,1).

В целом в агроэкосистемах в слоях почвы 0–20 см и 0–30 см наблюдалась тенденция к разрушению агрономически ценных агрегатов ($НСР_{05}$ = 10,5% в слое 0–20 см и 7,8% в слое 0–30 см). Это выразилось в снижении абсолютных значений коэффициента структурности по сравнению с почвой залежного участка. Если в опыте 2 основная антропогенная нагрузка на почвенную систему обусловлена многолетним влиянием механической обработки и применением одинаковых доз минеральных удобрений, то в опыте 1 она определялась также различным уровнем поступления удобрений в систему на протяжении 18 лет (табл. 2).

Таблица 1. **Параметры оструктуренности серой лесной почвы естественной экосистемы и агроэкосистем (опыт 2)**

Вариант	Слой, см	Содержание агрегатов размером 10–0,25 мм, %	Коэффициент структурности
Экосистема (контроль)	0–20	69,7	2,3
	0–30	67,7	2,1
Агроэкосистемы (яровая пшеница)			
Отвальная вспашка на 20–22 см + $N_{30}P_{30}K_{30}$	0–20	67,2	2,0
	0–30	60,5	1,6
Безотвальная обработка на 6–8 см + $N_{30}P_{30}K_{30}$	0–20	67,7	2,1
	0–30	64,0	1,8
Безотвальная обработка на 20–22 см + $N_{30}P_{30}K_{30}$	0–20	67,3	2,1
	0–30	66,2	2,0
$НСР_{05}$	0–20	10,5	–
	0–30	7,8	–

Таблица 2. **Параметры оструктуренности серой лесной почвы естественной экосистемы и агроэкосистем (опыт 1)**

Вариант, уровень интенсивности	Слой, см	Содержание агрегатов размером 10–0,25 мм, %	*Кс
Экосистема (контроль)	0–20	70,1	2,4
	0–30	67,9	2,1
Агроэкосистемы (яровая пшеница)**			
Нулевой (навоз 6,7 т $га^{-1}$)	0–20	70,8	2,4
		66,0	1,9
	0–30	69,8	2,3
		69,4	2,3
Интенсивный ($N_{45}P_{40}K_{40}$)	0–20	70,2	2,4
		67,6	2,1
	0–30	68,8	2,2
		69,3	2,3
Высокоинтенсивный минеральный ($N_{65}P_{60}K_{60}$)	0–20	72,4	2,6
		67,6	2,1
	0–30	71,8	2,5
		73,8	2,8
Высокоинтенсивный органоминеральный ($N_{71}P_{58}K_{58}$ + навоз 13 т $га^{-1}$)	0–20	76,5	3,2
		79,8	3,9
	0–30	74,0	2,8
		83,2	4,9
$НСР_{05}$**	0–20	7,9	–
		6,0	
	0–30	6,4	–
		3,1	

Примечание: *Кс – коэффициент структурности; ** – в числителе – отвальная вспашка на 20–22 см, в знаменателе – безотвальное рыхление на 20–22 см.

Исследования (опыт 1) показали, что содержание агрономически ценных агрегатов в слоях почвы 0–20 см и 0–30 см в агроэкосистемах было на том же уровне, что и в почве залежи, и в целом соответствовало отличному агрегатному состоянию. Однако с повышением интенсивности антропогенной нагрузки (увеличением дозы поступления органических и минеральных удобрений) в агроэкосистеме с высокоинтенсивным минеральным и высокоинтенсивным органоминеральным уровнями внесения удобрений содержание агрономически ценных агрегатов увеличивалось. На высокоинтенсивном минеральном фоне при отвальной вспашке данный показатель составил 72,4% (слой 0–20 см) и 71,8% (слой 0–30 см), а на высокоинтенсивном органоминеральном фоне – 76,5% в слое 0–20 см и 74,0% в слое 0–30 см.

На фоне безотвальной обработки на глубину 20–22 см содержание агрономически ценных агрегатов достоверно увеличилось до 79,8% и 83,2% в слоях 0–20 см и 0–30 см соответственно.

Аналогичное увеличение доли агрономически ценных агрегатов наблюдалось в почвах агроэкосистем с безотвальным рыхлением на фоне высокоинтенсивного использования минеральных удобрений (73,8% в слое 0–30 см).

Коэффициент структурности почвы во всех агроэкосистемах Владимирского ополья был на уровне отличного агрегатного состояния, то есть показания превышали значение 1,5. При этом с повышением дозы внесения минеральных и органических удобрений в агроэкосистемах на серой лесной почве коэффициент структурности увеличивался. Наиболее высокие показатели данного коэффициента отмечены в почвах агроэкосистем с безотвальной обработкой: 3,9 в слое 0–20 см и 4,9 в слое 0–30 см. В почве залежи он имел значения 2,4 и 2,1 соответственно.

В опыте 3 агроэкосистемы формировались на дерново-подзолистой супесчаной почве (Владимирская область) в течение 44 лет посредством применения отвальной вспашки на глубину 20–22 см и разных доз удобрений, которые определяли уровень интенсивности воздействия на агроэкосистему (табл. 3).

Таблица 3. **Параметры оструктуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы естественной экосистемы и агроэкосистем (опыт 3)**

Экосистема, антропогенные факторы	Слой, см	Содержание агрегатов размером 10–0,25 мм, %	Коэффициент структурности
Экосистема (контроль)	0–20	69,9	2,3
	0–30	72,1	2,6
Агроэкосистемы (озимая пшеница)			
Бессменный пар	0–20	50,8	1,0
	0–30	56,0	1,3
Экстенсивный	0–20	55,2	1,2
	0–30	55,1	1,2
Нулевой (навоз 20 т га$^{-1}$)	0–20	62,0	1,6
	0–30	63,6	1,7
Нормальный минеральный ($N_{50}P_{25}K_{60}$)	0–20	64,7	1,8
	0–30	64,4	1,8
Нормальный органоминеральный ($N_{25}P_{12}K_{30}$+навоз 5 т га$^{-1}$)	0–20	67,1	2,0
	0–30	67,4	2,1
Высокоинтенсивный органоминеральный ($N_{100}P_{50}K_{120}$ + навоз 10 т га$^{-1}$)	0–20	68,9	2,2
	0–30	69,6	2,3
$НСР_{05}$	0–20	9,5	–
	0–30	5,6	–

В результате многолетнего механического воздействия в агроэкосистеме с бессменным паром, где проводилась только механическая обработка почв, а растения не выращивались, происходило разрушение агрономически ценных агрегатов. Их содержание в слоях 0–20 см и 0–30 см уменьшилось на 19,1% и 6,1% соответственно по сравнению с контролем ($НСР_{05}$ = 9,5% и 5,6%).

В агроэкосистеме с экстенсивным уровнем воздействия, где выращивались сельскохозяйственные культуры и проводилась отвальная вспашка, однако удобрения не применялись, агрономически ценные агрегаты в почве также подвергались разрушению. Их содержание в слоях 0–20 см и 0–30 см снизилось на 14,7% и 17,0% соответственно ($НСР_{05}$ = 9,5% и 5,6%). Коэффициент структурности почвы в данном варианте уменьшился по сравнению с контролем, однако остался на уровне хорошего агрегатного состояния.

В агроэкосистемах с нулевым, нормальным и интенсивным органоминеральным уровнями воздействия с увеличением дозы вносимого удобрения наблюдалась только тенденция к разрушению агрономически ценных агрегатов (различия статистически недостоверны), а их содержание в изучаемых слоях почвы соответствовало отличному агрегатному состоянию. Коэффициент структурности варьировался в диапазоне 1,7–2,1.

Дальнейшее повышение уровня интенсивности воздействия на агроэкосистемы (высокоинтенсивный органоминеральный фон) за счёт увеличения дозы органического и минерального удобрений способствовало сохранению коэффициента структурности и количества агрономически ценных агрегатов на уровне контрольного варианта (лесной участок).

Исследования структурно-агрегатного состава были продолжены в опыте 4 (Ивановская область) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (табл. 4).

Таблица 4. **Параметры оструктуренности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы естественной экосистемы и агроэкосистем (опыт 4)**

Вариант	Слой, см	Содержание агрегатов размером 10–0,25 мм	Кс*
Экосистема (контроль)	0–20	85,3	5,8
	0–30	82,2	4,6
Агроэкосистема** ($N_{30}P_{60}K_{60}$)	0–20	67,3 / 77,7	2,1 / 3,5
	0–30	61,8 / 76,0	1,6 / 3,2
$НСР_{05}$**	0–20	8,7 / 9,8	–
	0–30	7,3 / 7,1	–

Примечание: *Кс – коэффициент структурности; ** – в числителе – отвальная вспашка на глубину 20–22 см, в знаменателе – безотвальное рыхление на глубину 20–22 см.

В агроэкосистемах с нормальным уровнем интенсивности технологий и различными приёмами механического рыхления за 27 лет произошло разрушение агрономически ценной структуры: в слое 0–20 см – на 18,0% ($НСР_{05}$ = 8,7%) при применении отвальной вспашки, в слое 20–22 см – на 7,6% ($НСР_{05}$ = 9,8%) при безотвальном рыхлении, в слое 0–30 см на 20,4% ($НСР_{05}$ = 7,3%) и 6,2% ($НСР_{05}$ = 7,1%) соответственно.

За счёт разрушения агрономически ценных агрегатов под воздействием антропогенных факторов коэффициент структурности в почвах агроэкосистем снижался. Наиболее низкие показатели коэффициента структурности отмечены в почве агроэкосистемы с отвальной вспашкой на глубину 20–22 см.

Результаты влияния антропогенных факторов (механического рыхления, удобрений и мелиорантов) на структуру дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в течение 36 лет в опыте 5 (Костромская область) представлены в табл. 5.

Таблица 5. **Параметры оструктуренности дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы естественной экосистемы и агроэкосистем (опыт 5)**

Вариант, уровень интенсивности	Слой, см	Содержание агрегатов размером 10–0,25 мм, %	Коэффициент структурности
Экосистема (контроль)	0–20	85,3	5,8
	0–30	86,2	6,2
Агроэкосистемы (яровой ячмень)			
Нормальный ($N_{32}P_{32}K_{32}$)	0–20	69,4	2,3
	0–30	66,1	2,0
Интенсивный (3 т га$^{-1}$ – $CaCO_3$ + $N_{32}P_{32}K_{32}$)	0–20	69,8	2,3
	0–30	71,8	2,5
Высокоинтенсивный (25 т га$^{-1}$ – $CaCO_3$ + $N_{96}P_{96}K_{96}$)	0–20	82,6	4,7
	0–30	77,4	3,4
$НСР_{05}$	0–20	9,2	–
	0–30	8,9	–

Применение технологий нормального и интенсивного уровней привело к снижению содержания агрономически ценных агрегатов в слоях почвы 0–20 см и 0–30 см. Их количество в слое 0–20 см снизилось на 15,9% и 14,5% ($НСР_{05}$ = 9,2%) соответственно, в слое 0–30 см – на 20,1% и 14,4% ($НСР_{05}$ = 8,9%). За счёт разрушения агрономически ценной структуры коэффициент структурности почвы в агроэкосистемах уменьшился в 2,5 раза в слое 0–20 см и в 3,1 раза в слое 0–30 см.

При увеличении нормы внесения удобрений до высокоинтенсивного уровня количество агрономически ценных агрегатов оставалось на уровне контрольного варианта (лесной участок) и составляло 82,6% в слое 0–20 см и 77,4% в слое 0–30 см.

ВЫВОДЫ

Содержание агрономически ценных агрегатов и коэффициент структурности почв агроэкосистем на серой лесной и дерново-подзолистых почвах зависят от интенсивности воздействия антропогенных факторов.

Интенсивное механическое рыхление серой лесной и дерново-подзолистой почвы агроэкосистем в результате вспашки приводит к снижению количества агрономически ценных агрегатов по сравнению с безотвальной обработкой. Коэффициент структурности в органогенном горизонте почв агроэкосистем (слой 0–30 см) снизился на 10–20% при вспашке и на 45% при безотвальной обработке.

С повышением уровня интенсивности антропогенного воздействия за счет применения органических и минеральных удобрений коэффициент структурности серой лесной среднесуглинистой почвы агроэкосистем увеличивается. Наиболее высокие показатели данного коэффициента отмечены в агроэкосистемах с безотвальной обработкой на глубину 20–22 см: 3,9 в слое 0–20 см и 4,9 в слое 0–30 см.

В дерново-подзолистой супесчаной почве агроэкосистемы с экстенсивным уровнем использования содержание агрономически ценных агрегатов в слоях 0–20 см и 0–30 см достоверно уменьшилось. Повышение уровня использования минеральных и органических удобрений от нормального до интенсивного органоминерального привело к увеличению коэффициента структурности почвы до уровня отличного агрегатного состояния – 1,7–2,1.

Повышение уровня воздействия на дерново-подзолистую супесчаную и легкосуглинистую почвы до высокоинтенсивного органоминерального за счёт увеличения дозы органического и минерального удобрений позволяет сохранить коэффициент структурности почв и количество агрономически ценных агрегатов на уровне естественных экосистем.

Список литературы

Белоусов А. А., Белоусова Е. Н. Динамика биологических свойств агросерой почвы и оценка степени ее устойчивости // Агрофизика. 2018. № 4. С. 1–7. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.04.01.

Борин А. А., Коновалова Л. К., Лощинина А. Э. Агротехнологии и продуктивность севооборота в условиях Верхневолжья // Владимирский земледелец. 2017. № 4(82). С. 14–15.

Борин А. А., Лощинина А. Э. Влияние различных систем обработки почвы на ее агрофизические свойства и урожайность культур севооборота // Агрофизика. 2018. № 3. С. 1–7. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.01.

Вербицкая О. П. Оптимизация минерального питания и десикация льна-долгунца в северных областях Центрального Нечерноземья. Автореф. дисс. канд. с.-х. наук. Немчиновка, 2004. 20 с.

Водюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследований физических свойств почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: учеб. пособие для с.-х. вузов. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Зинченко С. И. Основы обработки чернозёмов. М.: Транзит-Икс, 2006. 248 с.

Зинченко С. И., Щукин И. М., Лукин С. М., Борин А. А. Антропогенное воздействие на структуру дерново-подзолистых почв в агросистемах Верхневолжья // Владимирский земледелец. 2016. № 1(75). С. 21–24.

Зинченко М. К. Ферментативные процессы в серых лесных почвах Верхневолжья. Иваново: ПресСто, 2019. 124 с.

Зинченко М. К., Зинченко С. И., Борин А. А., Камнева О. П. Ферментативная активность аграрных почв Верхневолжья // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 3. С. 34–37.

Иванов Д. А. Ландшафтно-адаптивные системы земледелия (Агроэкологические аспекты). Тверь, 2001. 304 с.

Карпачевский Л. О. (ред.). Сельскохозяйственные экосистемы / Пер. с англ. А. С. Каменского, Ю. А. Смирнова, Э. Е. Хавкина. М.: Агропромиздат, 1987. С. 8–10.

Лукин С. М. Агроэкологическое обоснование систем применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах. Автореф. дисс. д-ра биол. наук. М., 2009. 49 с.

Шеин Е. В. Курс физики почв. Учебник. М.: МГУ, 2005. С. 62.

References

Belousov A. A., Belousova E. N. Dinamika biologicheskikh svoystv agroseroy pochvy i otsenka stepeni yeye ustoychivosti [Dynamics of biological properties of grey forest soil and assessment of its stability] // *Agrofizika*, 2018, no. 4, pp. 1–7. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.04.01.

Borin A. A., Konovalova L. K., Loschinina A. E. Agrotekhnologii i produktivnost' sevooborota v usloviyakh Verkhnevolzh'ya [Agricultural technologies and efficiency of crop rotation in Upper Volga Region] // *Vladimirskij zemledelec*, 2017, no. 4 (82), pp. 14–15.

Borin A. A., Loschinina A. E. Vliyaniye razlichnykh sistem obrabotki pochvy na yeye agrofizicheskiye svoystva i urozhaynost' kul'tur sevooborota [Impact of different soil treatment systems on its agrophysical properties and productivity of crop rotation] // *Agrofizika*, 2018, no. 3, pp. 1–7. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.01.

Verbitskaya O. P. *Optimizatsiya mineral'nogo pitaniya i desikatsiya l'na-dolgunca v severnykh oblastyakh Central'nogo Nechernozem'ya*. Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk. [Optimization of mineral nutrition and desiccation of fiber flax in northern regions of Nonblack Soil zone. Abst. diss. cand. agr. Sci.], Nemchinovka, 2004, 20 p.

Vodyunina A. F., Korchagina Z. A. *Metody issledovanii fizicheskikh svoistv pochvy* [Methods to research physical properties of soil], Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.

Dospekhov B. A. *Metodika polevogo opyta: ucheb. posobiye dlya s.-kh. vuzov* [Methodology of a field experiment: study guide for agrarian universities], Moscow: Agropromizdat, 1985, 351 p.

Zinchenko S. I. Osnovy obrabotki chernozyomov [Base techniques of black earth soils treatment], Moscow: Publishing house Tranzit-Iks, 2006, 248 p.

Zinchenko S. I., Schukin I. M., Lukin S. M., Borin A. A. Antropogennoye vozdeistviye na strukturu dernovo-podzolistykh pochv v agrosistemakh Verkhnevolzh'ya [Antropogenic impact on sod-podzolic soil structure in agricultural systems of Upper Volga Region] // *Vladimirskii zemledelets*, 2016, no. 1 (75), pp. 21–24.

Zinchenko M. K. *Fermentativnyye processy v serykh lesnykh pochvakh Verkhnevolzh'ya* [Fermentation process in grey forest soils of Upper Volga Region], Ivanovo: Publishing house PresSto, 2019, 124 p.
Zinchenko M. K., Zinchenko S. I., Borin A. A., Kamneva O. P. Fermentativnaya aktivnost' agrarnykh pochv Verkhnevolzh'ya [Fermentation activity of farmland soils in Upper Volga Region] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2017, no. 3, pp. 34–37.
Ivanov D. A. *Landshaftno-adaptivnyye sistemy zemledeliya* (agroekologicheskiye aspekty) [Landscape-adaptive farming systems (agroecological aspects)], Tver, 2001, 304 p.
Karpachevskii L. O. (red.). *Sel'skokhozyaistvennyye ekosistemy* [Agricultural ecosystems] / Per. s angl. A. S. Kamenskogo, Yu. A. Smirnova, E. E. Khavkina. Moscow: Agropromizdat, 1987, pp. 8–10.
Lukin S. M. *Agroekologicheskoye obosnovaniye sistem primeneniya udobrenii v sevooborotakh na dernovo-podzolistykh supeschanykh i peschanykh pochvakh.* Avtoref. diss. d-ra biol. nauk [Agricultural and ecological practices of applying fertilizers on sod-podzolic sandy loam and sandy soil within crop rotation. Abst. diss. Doc. boil. Sci.], Moscow, 2009, 49 p.
Shein E. V. *Kurs fiziki pochv*. Uchebnik [Soil physics. Textbook], Moscow: Publishing house Moscow State University, 2005, 62 p.

УДК 631.42 DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.04

ЛАБИЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ УГЛЕРОДА И АЗОТА, ЭКСТРАГИРУЕМЫЕ ГОРЯЧЕЙ ВОДОЙ, В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ С БИОУГЛЕМ И РАСТИТЕЛЬНЫМИ ОСТАТКАМИ

В. А. Милосердова[1], Е. Я. Рижия[2], Н. Е. Орлова[1], Т. А. Банкина[1]

[1]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
199034, Санкт-Петербург, 16-я линия В.О., д. 29;
[2]ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14
E-mail: bankinaagro@mail.ru

Поступила в редакцию 19 августа 2019 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

В связи с существующими неопределенностями относительно рационального использования биоугля как мелиоранта сельскохозяйственных почв проведен вегетационный лабораторный эксперимент, в котором изучено воздействие древесного биоугля из карельской березы, внесенного в дерново-подзолистую супесчаную почву совместно с растительными остатками, на изменение некоторых форм лабильных соединений углерода и азота. Схема эксперимента включала 6 вариантов: (1) почва с биоуглем; (2) почва с растительными остатками клевера; (3) почва с растительными остатками тимофеевки; (4) совместное внесение биоугля и растительных остатков клевера; (5) совместное внесение биоугля и растительных остатков тимофеевки; (6) контроль – без биоугля и растительных остатков. При совместном внесении биоугля с растительными остатками клевера и тимофеевки их дозы составляли 15 т га$^{-1}$ и 20 т га$^{-1}$ сырой биомассы соответственно. Исследования содержания аммонийного, нитратного и общего азота в почве проведены при помощи общепринятых методов, а экстракция лабильного углерода ($C_{эгв}$) и азота ($N_{эгв}$) – по методу Шульц-Кершенса (горячей водой). Установлено, что внесение биоугля не оказало достоверного влияния на содержание $C_{эгв}$ в почве, но вызвало достоверное снижение (на 13%) количества $N_{эгв}$ к концу эксперимента. Внесение растительных остатков клевера и тимофеевки привело к усилению процессов минерализации органического вещества в почве, что сопровождалось увеличением содержания в ней водорастворимого лабильного углерода и снижением количества водорастворимого органического азота. При внесении в почву растительных остатков клевера и тимофеевки усилилось поступление азота в растения кукурузы, что привело к увеличению их биомассы. Внесение биоугля в сочетании с растительными остатками (особенно клевера) способствовало снижению эффективности воздействия последних на интенсивность минерализационных процессов в почве, азотное питание и формирование биомассы растений кукурузы.

Растительные остатки бобовых культур целесообразно вносить в почву в сочетании с биоуглем для снижения интенсивности их минерализации и обеспечения пролонгированного поступления азота в растения.

Ключевые слова: биоуголь, растительные остатки, клевер, тимофеевка, водорастворимый углерод, водорастворимый азот, азотное питание, кукуруза.