

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2019-98-77-104

Ссылки для цитирования:

Таллер Е.Б., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Данченко Н.Н. Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества хроноряда дерново-подзолистых почв в процессе лесовосстановления // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 77-104. DOI: 10.19047/0136-1694-2019-98-77-104

Cite this article as:

Taller E.B., Artemyeva Z.S., Kirillova N.P., Danchenko N.N., Dynamics of organic matter under the afforestation of the former agricultural sod-podzolic soils, Dokuchaev Soil Bulletin, 2019, V. 98, pp. 77-104, DOI: 10.19047/0136-1694-2019-98-77-104

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ХРОНОРЯДА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ В ПРОЦЕССЕ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ

© 2019 г. Е. Б.Таллер¹, З. С. Артемьева^{2*},
Н. П. Кириллова³, Н. Н. Данченко²

¹РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия,
127550, Москва, Тимирязевская ул., 49, e-mail: etallereb@mail.ru.

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия,
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, *e-mail: artemyevazs@mail.ru.

³МГУ им М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские Горы, 1,
e-mail: npkirillova@yandex.ru.

Поступила в редакцию 07.05.2019, после доработки 28.06.2019,
принята к публикации 05.09.2019

На основе изучения гумусового состояния почв с помощью метода грануло-денсиметрического фракционирования исследована динамика качественного состава органического вещества хроноряда дерново-подзолистых почв в процессе лесовосстановления. Объектами исследования послужили дерново-подзолистые почвы хроноряда залежных участков, включающих основные стадии развития вторичной сукцессии: от зарастания травянистой растительностью до зональных ельников особо охраняемой природной территории Центрально-Лесного

государственного природного биосферного заповедника. В первые 20–25 лет после перевода пахотного участка в залежь наблюдаются деградационные изменения гумусового состояния дерново-подзолистых почв, обусловленные отсутствием агротехнологических обработок и недостатком свежего органического вещества (ОВ) культурных растений. Показано, что лишь по прошествии 50 лет функционирования в режиме залежи качественные и количественные показатели ОВ дерново-подзолистых почв начинают приближаться к таковым ельников разного видового состава возрастом более 100 лет. Это проявляется в увеличении количества дискретного ОВ, уровне накопления углерода данной фракции ОВ в почве и величине ее долевого участия в общем уровне накопления углерода в почве.

Ключевые слова: лесовосстановление, органическое вещество, гранулоденсиметрическое фракционирование, дискретное органическое вещество, легкие фракции, илистые фракции.

DYNAMICS OF ORGANIC MATTER UNDER THE AFFORESTATION OF THE FORMER AGRICULTURAL SOD-PODZOLIC SOILS

**E. B. Taler¹, Z. S. Artemyeva^{2*}, N. P. Kirillova³,
N. N. Danchenko²**

¹*Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Russia, 127550, Moscow, Timiryazevskaya str., 49,
e-mail: etallereb@mail.ru.*

²*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
Russia, 119017, Moscow, Pizhevskiy per., 7, build. 2
*<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, *e-mail: artemyevazs@mail.ru.*

³*Lomonosov Moscow State University,
Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1,
e-mail: npkirillova@yandex.ru.*

Received 07.05.2019, Revised 28.06.2019, Accepted 05.09.2019

The dynamics of the organic matter of the chronosequence of sod-podzolic soils in the process of reforestation has been investigated using the granulodensitometric fractionation. The objects of research were sod-podzolic soils of the chronosequence of abandoned areas, including the main stages of the development of secondary succession: from overgrowing by grass vegetation to zonal spruce forests of the specially protected natural territory of the Central

Forest State Natural Biosphere Reserve. In the first 20–25 years after the reduction of agrocenosis, degradation changes of the humus state of sod-podzolic soils were observed, due to the lack of agrotechnological treatments and the lack of fresh organic matter (OM) of cultivated plants. It is shown that only after 50 years functioning in the reservoir regime, the qualitative and quantitative indicators of organic matter of sod-podzolic soils begin to approach those of spruce forests of different species composition over 100 years old. This is manifested in an increase in the amount of discrete OM, the level of carbon accumulation of this fraction of OM in the soil and the value of its share in the total carbon accumulation in the soil.

Keywords: afforestation, organic matter, granulo-densitometric fractionation, discrete organic matter, light fractions, clay.

ВВЕДЕНИЕ

За последние 30 лет около 38 млн га пахотных земель России, что составляет 1/3 общей посевной площади 1990 г., было выведено из сельскохозяйственного оборота ([Россия в цифрах, 2017](#)). Эта часть пахотного фонда перешла в залежь и постепенно зарастает кустарником и мелколесьем. В пахотных почвах, выпавших из сферы сельскохозяйственного использования, восстанавливается естественный зональный тип почвообразования с последовательной сменой биогеоценозов в ряду: агроценоз – залежь – лес. Смена культурного ценоза естественной зональной растительностью на бывших пахотных почвах способствует трансформации пахотного слоя и постепенному восстановлению генетического профиля зональных лесных почв. Таким образом, лесовозобновление на старопахотных землях сопровождается обратным переходом почвы от сельскохозяйственной освоенной к почвам лесного ряда ([Владыченский, Телеснина, 2007](#); [Люри, Горячкин, 2010](#); [Телеснина и др., 2017](#); [Артемьева, 2017](#)). Наибольший интерес исследователей вызывают изменения содержания органического вещества (ОВ) при лесовозобновлении. Этому посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ([Баранова, 1987](#); [Баранова и др., 1989](#); [Литвинович и др., 2002](#); [Курганова и др., 2006, 2007](#); [Артемьева и др., 2013](#); [Артемьева, 2017](#); [Vesterdal et al., 2002](#); [Paul et al., 2003](#); [Hooker, Compton, 2003](#); [Falkengen-Grerup et al., 2005](#); [Morris et al., 2007](#); [Smal, Olszewska, 2008](#); [Kalinina et al., 2009](#); [2015](#); [Artemyeva et al., 2018](#)).

Тем не менее, несмотря на большое количество работ, посвященных данной проблеме, однозначное мнение о направлении и характере динамики содержания и запасов ОВ при лесовозобновлении отсутствует. Большинство исследователей отмечают, что отсутствие отчуждения растительного материала в виде урожая и последующее восстановление многолетней растительности на бывших пахотных почвах инициируют процессы накопления углерода ([Артемяева и др., 2013](#); [Рыжова и др., 2015](#); [Артемяева, 2017](#); [Ерохова и др., 2014](#); [Artemyeva et al., 2018](#)). Многие исследователи обращают внимание на то, что вновь образованное органическое вещество должно характеризоваться разными количественным и качественным составами ([Lopes de Gerenyu et al., 2008](#); [Артемяева и др., 2013](#); [Рыжова и др., 2015](#); [Артемяева, 2017](#); [Ерохова и др., 2014](#)). При этом направленность и интенсивность этих процессов зависит от продолжительности периода восстановительной сукцессии. Наиболее противоречивые данные отмечены для небольших сроков функционирования в режиме залежи бывших пахотных почв. В некоторых работах выявлено, что содержание углерода в первые 4–10 лет после вывода пахотных почв из сельскохозяйственного оборота меняется незначительно ([Kalinina et al., 2013](#); [Артемяева, 2017](#)). В то же время в литературе имеются свидетельства о снижении содержания и запасов ОВ в первые 10 лет после вывода пахотных почв из сельскохозяйственного оборота в первую очередь за счет ослабления выраженности дернового процесса при сведении культурного ценоза ([Литвинович и др., 2011](#)). Тем не менее после 15–20 лет наблюдается устойчивое увеличение содержания и запасов углерода в залежных почвах ([Kalinina et al., 2013](#); [Артемяева, 2017](#)).

Большое значение имеет гранулометрический состав почв, на которых протекает лесовозобновление, и степень окультуренности пахотной почвы. Так для песчаных почв отмечено, что при их интенсивной окультуренности запасы ОВ в них убывают, тогда как при зарастании пашни, образованной на суглинистой почве, запасы ОВ сначала убывают, а далее возрастают на стадии щучкового луга ([Матинян и др., 2007](#)). В то же время при изучении зарастания пашни, образованной на флювиогляциальных песках, было выявлено, что содержание и запасы ОВ сначала увеличива-

лись на луговой стадии, а затем, после появления леса, постепенно уменьшались ([Фомина, 2009](#)).

Использование новых методологических подходов к оценке свойств почв могло бы существенно обогатить информационную базу для такого рода исследований. В частности, такая возможность может быть реализована на основе изучения составляющих ОВ почвы с помощью грануло-денсиметрического фракционирования. Метод гранулоденсиметрического фракционирования позволяет выделять достаточно гомогенные по морфологическим признакам, химическому составу и устойчивости к минерализации функционально значимые компоненты ОВ почвы разных периодов круговорота в мало измененном состоянии. Данный метод был успешно применен при исследовании динамики ОВ в процессе лесовозобновления в том числе на дерново-подзолистых почвах ([Артемьева и др., 2013](#); [Артемьева, 2017](#); [Artemyeva et al., 2017, 2018](#)), [Kalinina et al., 2013, 2015](#); [Popelau, Don, 2013](#); [Li et al., 2016](#)). Учитывая роль ОВ почвы в углеродном балансе наземных экосистем и глобальном цикле углерода, а также широкое распространение залежных земель в мире, и в России в частности, изучение динамики разных пулов ОВ почвы в процессе лесовозобновления актуально.

Целью настоящей работы является изучение динамики разных пулов ОВ в процессе постагрогенного развития в сопоставимом ряду дерново-подзолистых почв южной тайги почв разновременных залежных участков.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили дерново-подзолистые почвы хроноряда залежных участков, включающих основные стадии развития вторичной сукцессии: от зарастания травянистой растительностью до зональных ельников особо охраняемой природной территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (ООПТ ЦЛГПБЗ). Заповедник расположен в Тверской области, в верховьях реки Межи, к северу от города Нелидово.

Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник служит эталоном южно-таежных лесов в цен-

тральной части европейской России. Это область умеренно-континентального климата. Среднегодовая температура воздуха составляет + 3.6 °С. Среднегодовая сумма осадков составляет 700 мм. Среднее значение гидротермического коэффициента Селянинова – 1.6. Основные данные, включая географические координаты, климатические параметры, почвы, породы, видовой состав растительности приведены в таблице 1.

Исследуемые залежные участки находятся в средней части длинного склона западной экспозиции, что обеспечивает преимущественно автоморфные условия увлажнения. Зарастающие участки являются краевыми фрагментами постепенно зарастающей пашни, где почти все культурные растения сменились естественной флорой. Все залежные участки расположены на сопоставимых дерново-палево-подзолистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых моренным суглинком в пределах 300-метровой трансекты и в сопоставимых геоморфологических и литологических условиях (диагностируются по плотности сложения почв).

Объекты исследования: 1) свежая залежь с луговым разнотравьем (5–7 лет); 2) залежь, заросшая березняком с включением подроста осины (*Betula pendula* + *Pópulus trémula*) возрастом 10–15 лет; 3) залежь, заросшая березняком (*Betula pendula*) возрастом 20–25 лет; 4) березняк с примесью осины (*Betula pendula* + *Pópulus trémula*) возрастом 50–60 лет; 5) ельник чернично-разнотравный (*Picea abies* – *Vaccinium myrtillus* – *Hylocomium splendns* + *Pleurozium schreberi*) возрастом старше 100–120 лет; ельник чернично-кисличный (*Picea abies* – *Vaccinium myrtillus* + *Oxalis acetosella*) возрастом старше 100–120 лет; ельник кислично-щитовниковый (*Picea abies* – *Oxalis acetosella* + *Dryopteris dilatata*) возрастом старше 100–120 лет.

Для исследования состояния ОБ был использован модифицированный вариант грануло-денсиметрического метода, позволяющий выделить три качественно различные группы органических и органо-минеральных составляющих почвы, концентрирующих основную массу ОБ и тонкодисперсных минеральных компонентов почвы ([Артемяева, 2010](#)).

Таблица 1. Расположение района исследования, растительность и исследуемые почвы
Table 1. Location of study area, vegetation and investigated soil type

Возраст	Видовой состав	Почва	Горизонт	Глубина, см	$C_{общ}$ % в почве	ρ , г/см ³
5–7 лет	Луговое разнотравье	Дерново-палево-подзолистая легко-суглинистая	A ₁	3–12	1.86	0.89
			A ₁ '	12–29	1.09	0.95
			A ₂	29–35	0.75	1.13
10–15 лет	Береза		A ₁	3–15	1.43	0.96
			A ₁ A ₂	15–28	1.12	1.36
			A ₂	28–43	0.46	1.38
20–25 лет	Береза		A ₁	4–20	1.20	1.04
			A ₁ A ₂	20–26	1.25	1.21
			A ₂	26–40	0.57	1.56
50–60 лет	Береза + осина		A ₁	3–16	1.90	1.04
			A ₁ A ₂	16–30	1.29	1.33
			A ₂	30–44	0.64	1.38
100–120 лет	Ельник чернично-разнотравный (ЕЧР)	A ₁	4–10	3.57	1.16	
		A ₁ '	10–16	1.74	1.23	
		A ₁ A ₂	16–26	1.13	1.48	
	Ельник чернично-кисличный (ЕЧК)	A ₁	4–10	4.76	1.08	
		A ₁ A ₂	10–20	0.85	1.09	
		A ₂	20–30	0.31	1.24	
	Ельник кислично-щитовниковый (ЕКЩ)	A ₁	3–7	5.68	0.87	
		A ₁ '	7–17	2.73	1.05	
		A ₁ A ₂	17–32	0.92	1.23	

Примечание: горизонты A₁ и A₁' в залежной почве (5–7 лет) были выделены по плотности.

В первую группу входят легкие фракции (ЛФ) плотностью $< 1.8 \text{ г/см}^3$, ОВ которых не связано прочными химическими связями с глинистыми минералами и представлено органическими остатками разной степени гумификации. Вторая группа – органо-глинистые комплексы плотностью $> 1.8 \text{ г/см}^3$, размером $< 1 \text{ мкм}$ – продукты взаимодействия гумусовых соединений с глинистыми минералами (ил). Третья группа – остаток после выделения первых двух фракций, включает крупнозернистый минеральный компонент, устойчивые в УЗ-поле микроагрегаты, а также угли и углеподобные вещества.

ЛФ были выделены с помощью бромформ-этанольной смеси (БЭМ) плотностью 1.8 г/см^3 до и после того, как из почвы после 15-минутного воздействия ультразвуком (УЗ) на почвенную суспензию была удалена илистая фракция. Для физического диспергирования был использован ультразвуковой диспергатор зондового типа (LUZD-0,5K-02-00000 PS (Criamid, Russia). Озвучивание (69.7 Дж мл^{-1}) образца почвы ($10 \text{ г} + 50 \text{ мл}$ деионизированной воды) проводилось в течение 1 минуты с последующим центрифугированием в соответствии с законом Стокса, и повторялось 15 раз. Водная суспензия глинистых частиц ($< 1 \text{ мкм}$) собиралась и высушивалась ($60 \text{ }^\circ\text{C}$). Свободное ОВ (ЛФ_{СВ}), не входящее в состав микроагрегатов, сосредоточено в ЛФ плотностью $< 1.8 \text{ г/см}^3$, выделяемых до процедуры озвучивания, а агрегированное ОВ, включенное в состав микроагрегатов (ЛФ_{АГР}), выделяется после озвучивания ([Артемьева, 2010](#); [Артемьева, Федотов, 2013](#)).

Общий углерод ($C_{\text{общ}}$) и углерод органических и органо-минеральных фракций ($C_{\text{ЛФ}}^{\text{СВ}}$, $C_{\text{ЛФ}}^{\text{АГР}}$, $C_{\text{Ил}}$ и $C_{\text{Ост}}$) определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Japan).

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA). Выбранный уровень значимости $P < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлено, что в первые 20–25 лет функционирования в режиме залежи в дерново-подзолистых почвах рассмотренного хронологического ряда наблюдается снижение количества дискретного ОВ (ЛФ)

(табл. 2, рис. 1). Это обусловлено тем, что масштаб восстановления естественной растительности не компенсирует недостаток свежего ОВ в результате сведения агроценоза.

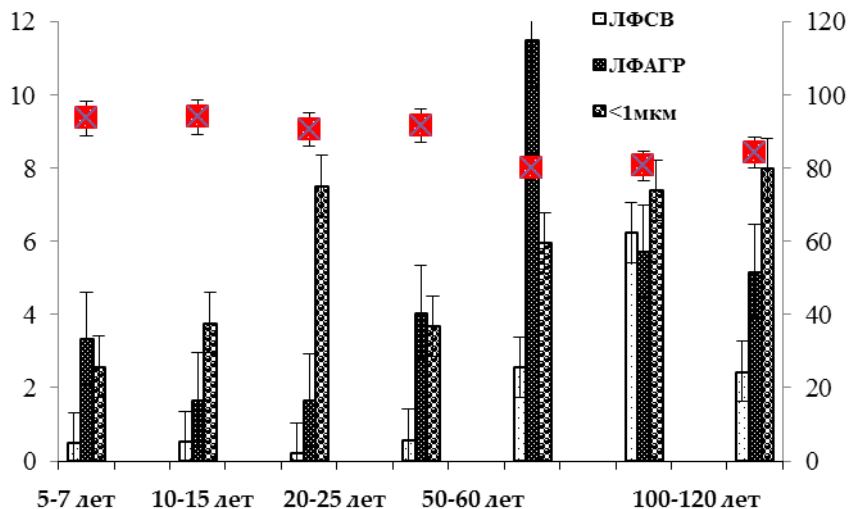


Рис. 1. Масса органических и органо-минеральных фракций в верхних горизонтах исследованных почв хроноряда (%).

Fig. 1. The bulk of organic and organo-mineral fractions in the upper horizons of the studied soils (%).

По достижении срока функционирования в режиме залежи 50 лет наблюдается резкое повышение уровня накопления дискретного ОВ, что обусловлено накоплением мертвой биомассы в почве данного участка в течение достаточно продолжительного срока. Следует отметить, что количество дискретного ОВ в почвах ельников превышает таковое разновозрастных залежных участков в 2.6–6.3 раза (табл. 2).

Анализ экспериментальных данных по концентрации углерода органических и органо-минеральных фракций показал, что все рассматриваемые группы ОВ существенно различаются между собой по данному показателю (табл. 3).

Таблица 2. Распределение органических и органо-минеральных фракций в почвах исследованного хроноряда
Table 2. Distribution of organic and organo-mineral fractions in the studied soils

Ценоз	Возраст, годы	Видовой состав	Горизонт	Глубина, см	Масса, %			
					Легкие фракции, пл. < 1.8 г/см ³		Ил	Остаток
					ЛФ _{св}	ЛФ _{дгр}		
Залежь	5–7	Луговое разнотравье	A ₁	3–12	0.51 (0.23)	3.35 (0.10)	2.58 (0.06)	93.57 (0.21)
			A ₁ '	12–29			3.41 (0.04)	96.59 (0.04)
			A ₁ A ₂	29–35			3.18 (0.08)	96.82 (0.08)
	10–15	Береза	A ₁	3–15	0.54 (0.07)	1.68 (0.05)	3.78 (0.08)	94.00 (0.11)
			A ₁ A ₂	15–28			4.32 (0.19)	95.68 (0.16)
			A ₂	28–43			2.90 (0.08)	97.10 (0.08)
	20–25	Береза	A ₁	4–20	0.23 (0.04)	1.67 (0.06)	7.52 (0.02)	90.59 (0.12)
			A ₁ A ₂	20–26			8.23 (0.08)	91.77 (0.08)
			A ₂	26–40			6.35 (0.12)	93.65 (0.12)
	50–60	Береза + осина	A ₁	3–16	0.59 (0.06)	4.06 (0.04)	3.69 (0.1)	91.67 (0.00)
			A ₁ A ₂	16–30			5.33 (0.08)	94.67 (0.08)
			A ₂	30–44			5.27 (0.11)	94.77 (0.11)
Лес	100–120	Ельник чернично-разнотравный	A ₁	4–10	2.45 (0.14)	5.19 (0.13)	7.99 (0.65)	84.37 (0.92)
			A ₁ '	10–16			10.00 (0.78)	90.00 (0.78)
			A ₁ A ₂	16–26			5.54 (0.27)	94.46 (0.27)
	100–120	Ельник чернично-кисличный	A ₁	4–10	6.24 (0.27)	5.74 (0.13)	7.39 (0.14)	80.63 (0.55)
			A ₁ A ₂	10–20			5.71 (0.21)	94.29 (0.21)
			A ₂	20–30			1.92 (0.63)	98.08 (0.63)
	100–120	Ельник кислично-щитовниковый	A ₁	3–7	2.56 (0.20)	11.5 (0.28)	5.97 (0.19)	79.97 (0.67)
			A ₁ '	7–17			6.12 (0.03)	93.88 (0.02)
			A ₁ A ₂	17–32			5.49 0.18	94.51 (0.18)

Примечание: в скобках – доверительный интервал.

Таблица 3. Величина концентрации углерода органических и органо-минеральных фракций в дерново-подзолистых почвах исследованного хронологического ряда

Table 3. The carbon content (% in fraction) in organic and organo-mineral fractions of the studied sod-podzolic soils

Ценоз	Возраст, годы	Видовой состав	Горизонт	Глубина, см	Легкие фракции пл. < 1.8 г/см ³		Ил	Остаток
					ЛФ _{СВ}	ЛФ _{АП}		
Залежь	5–7	Луговое разнотравье	A ₁	3–12	20.34 (2.04)	22.58 (2.11)	12.36 (0.12)	0.73 (0.05)
			A ₁ '	12–29			12.54 (0.10)	0.68 (0.04)
			A ₁ A ₂	29–35			10.14 (0.08)	0.44 (0.12)
	10–15	Береза	A ₁	3–15	24.14 (1.70)	26.66 (0.41)	10.09 (0.42)	0.50 (0.00)
			A ₁ A ₂	15–28			12.15 (0.10)	0.63 (0.05)
			A ₂	28–43			9.56 (0.14)	0.18 (0.03)
	20–25	Береза	A ₁	4–20	21.43 (0.14)	20.32 (0.12)	6.62 (0.08)	0.34 (0.06)
			A ₁ A ₂	20–26			8.60 (0.11)	0.59 (0.04)
			A ₂	26–40			6.11 (0.12)	0.19 (0.04)
	50–60	Береза + осина	A ₁	3–16	30.90 (0.59)	19.40 (0.09)	10.88 (0.07)	0.58 (0.00)
			A ₁ A ₂	16–30			10.91 (0.46)	0.75 (0.05)
			A ₂	30–44			7.31 (0.07)	0.27 (0.06)
Лес	100–120	Ельник чернично-разнотравный	A ₁	4–10	24.38 (0.24)	21.80 (0.00)	10.88 (0.24)	1.15 (0.04)
			A ₁ '	10–16			10.71 (0.34)	0.74 (0.08)
			A ₁ A ₂	16–26			12.21 (0.41)	0.48 (0.11)
	100–120	Ельник чернично-кисличный	A ₁	4–10	30.77 (0.43)	20.52 (0.25)	10.11 (0.11)	1.13 (0.04)
			A ₁ A ₂	10–20			7.28 (0.24)	0.46 (0.04)
			A ₂	20–30			7.88 (0.39)	0.16 (0.08)
	100–120	Ельник кислично-щитовниковый	A ₁	3–7	23.26 (0.12)	22.85 (0.29)	17.69 (0.02)	1.76 (0.04)
			A ₁ '	7–17			13.91 (0.04)	2.00 (0.06)
			A ₁ A ₂	17–32			9.34 (0.12)	0.43 (0.10)

Примечание: в скобках – доверительный интервал.

Свободное ОВ (ЛФ_{СВ}), обогащенное легкоразлагаемыми остатками растительного и микробного происхождения, локализуется в межагрегатном поровом пространстве почвы, являясь фракцией с наименьшей массой, обладает наиболее высокой величиной концентрации углерода: 20.3–30.9 % (М фракции). Чуть меньшими величинами концентрации углерода характеризуется агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР}) – 20.5–26.6 % (М фракции (табл. 3).

Величина концентрации $C_{Ил}$, в которой органические соединения прочно связаны с глинистыми минералами и оксидами-гидроксидами Fe и Al, гумусоаккумулятивных горизонтов почв исследованного хроноряда варьирует от 6.6 % до 17.7 % (М фракции) (в верхних горизонтах) и в пределах 6.1–10.1 % (М фракции) в горизонте A₂ (табл. 3). Исключение отмечено лишь для ельника чернично-разнотравного, где величина концентрации $C_{Ил}$ сопоставима с таковыми верхних горизонтов.

Величина концентрации углерода фракции Остатка верхних двух горизонтов разновозрастных залежных участков колеблется в широких пределах – от 0.34 до 0.75 % (М фракции), в горизонте A₁A₂ / A₂ отмечена меньшая степень варьирования: от 0.2 до 0.48 % (М фракции) (табл. 3). В ельниках разного видового состава величина концентрации углерода фракции Остатка в горизонте A₁ существенно выше (в 2.4–5.2 раза) таковой залежных участков.

Уровень накопления углерода в гумусово-аккумулятивных горизонтах дерново-подзолистых почв исследованного хроноряда колеблется в пределах 1.2–5.8 % (М почвы), в горизонте A₁' / A₁A₂ величина $C_{общ}$ существенно ниже и колеблется в пределах 0.9–2.7 % (М почвы). Для нижних горизонтов отмечены минимальные наблюдаемые значения (табл. 4).

Таблица 4. Уровень накопления углерода органическими и органо-минеральными фракциями в дерново-подзолистых почвах исследованного хронологического ряда

Table 4. The carbon content (% in soil) in organic and organo-mineral fractions of the studied sod-podzolic soils

Ценоз	Возраст, годы	Видовой состав	Горизонт	Глубина, см	Углерод, % М почвы				С _{общ}
					Легкие фракции, пл. < 1.8 г/см ³		Ил	Остаток	
					ЛФ _{СВ}	ЛФ _{АГР}			
Залежь	5–7	Луговое разнотравье	A ₁	3–12	0.10 (0.00)	0.76 (0.05)	0.32 (0.00)	0.68 (0.04)	1.86 (0.00)
			A ₁ '	12–29			0.43 (0.01)	0.66 (0.04)	1.09 (0.05)
			A ₁ A ₂	29–35			0.32 (0.01)	0.43 (0.11)	0.75 (0.12)
	10–15	Береза	A ₁	3–15	0.13 (0.03)	0.45 (0.01)	0.38 (0.01)	0.47 (0.00)	1.43 (0.01)
			A ₁ A ₂	15–28			0.52 (0.01)	0.60 (0.05)	1.12 (0.06)
			A ₂	28–43			0.28 (0.00)	0.18 (0.03)	0.46 (0.03)
	20–25	Береза	A ₁	4–20	0.05 (0.01)	0.34 (0.01)	0.50 (0.00)	0.31 (0.06)	1.20 (0.07)
			A ₁ A ₂	20–26			0.71 (0.00)	0.54 (0.04)	1.25 (0.03)
			A ₂	26–40			0.39 (0.01)	0.18 (0.04)	0.57 (0.00)
	50–60	Береза + осина	A ₁	3–16	0.18 (0.02)	0.79 (0.00)	0.40 (0.01)	0.53 (0.00)	1.90 (0.01)
			A ₁ A ₂	16–30			0.58 (0.03)	0.71 (0.05)	1.29 (0.01)
			A ₂	30–44			0.38 (0.00)	0.26 (0.06)	0.64 (0.05)
Лес	100–120	Ельник чернично-разнотравный	A ₁	4–10	0.60 (0.04)	1.13 (0.03)	0.87 (0.09)	0.97 (0.02)	3.57 (0.18)
			A ₁ '	10–16			1.07 (0.05)	0.67 (0.06)	1.74 (0.11)
			A ₁ A ₂	16–26			0.68 (0.01)	0.45 (0.11)	1.13 (0.10)
	100–120	Ельник чернично-кисличный	A ₁	4–10	1.92 (0.06)	1.18 (0.01)	0.75 (0.01)	0.91 (0.04)	4.76 (0.04)
			A ₁ A ₂	10–20			0.42 (0.00)	0.43 (0.04)	0.85 (0.04)
			A ₂	20–30			0.15 (0.04)	0.16 (0.08)	0.31 (0.12)
	100–120	Ельник кислично-щитовниковый	A ₁	3–7	0.60 (0.04)	2.63 (0.10)	1.06 (0.03)	1.41 (0.02)	5.68 (0.20)
			A ₁ '	7–17			0.85 (0.00)	1.88 (0.05)	2.73 (0.06)
			A ₁ A ₂	17–32			0.51 (0.01)	0.41 (0.09)	0.92 (0.08)

Примечание: в скобках – доверительный интервал.

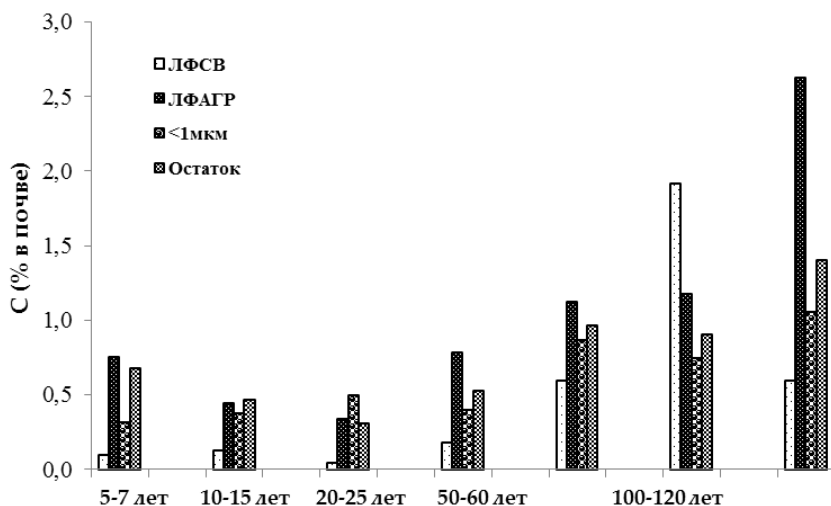


Рис. 2. Содержание углерода органических и органо-минеральных фракций в верхних горизонтах исследованных почв хроноряда (% в почве).

Fig. 2. The carbon content (% in soil) in organic and organo-mineral fractions of the upper horizons of the studied soils.

При анализе уровня накопления $C_{\text{общ}}$ четко выделяются почвы лесных участков возрастом более 100 лет, в которых уровень накопления углерода в верхнем гумусоаккумулятивном горизонте превышает таковой почв залежей: 3.6–5.8 vs. 1.2–1.9 (% М почвы). Средние величины $C_{\text{общ}}$ для ельников разного видового состава почти в три раза выше по сравнению с таковыми почв рассмотренного хроноряда (табл. 4, рис. 2). Учитывая, что ельник кислично-щитовниковый представляет последнюю (5-ю) стадию сукцессии, полученные аналитические данные согласуются с литературными данными об увеличении $C_{\text{общ}}$ при зарастании дерново-подзолистых почв, выведенных из сельскохозяйственного использования (Баранова, 1987; Leifeld, Kogel-Knabner, 2005; Christensen, 1992; Guggenberger, Zech, 1999; Артемьева и др., 2013, 2014; Артемьева, 2017; Artemyeva et al., 2017, 2018).

Прослеживается тенденция к снижению $C_{\text{общ}}$ в верхних горизонтах исследованных почв хроноряда в течение первых 25 лет

лесовосстановления с последующим повышением величины $C_{\text{общ}}$, по мере увеличения сроков залежи (табл. 4, рис. 2). Достаточно высокие значения $C_{\text{общ}}$ в почвах, развивающихся под луговым разнотравьем, обусловлено, по-видимому, пролонгированным последствием положительного влияния их сельскохозяйственного прошлого.

Это сопровождается развитием процессов, способствующих дифференциации верхних горизонтов по содержанию углерода, отмечаемое многими авторами, что связывают в первую очередь с протекающими процессами восстановления профиля, характерного данному биоценозу ([Литвинович и др., 2002](#); [Артемьева, 2017](#)). С увеличением сроков лесовосстановления свыше 50 лет разница в содержании $C_{\text{общ}}$ в верхнем и нижележащем горизонтах достигает 1.5–5.6 раз соответственно, что обусловлено прежде всего высокой степенью аккумуляции $C_{\text{ЛФ}}$ (в 3.2–4.4 раза) в гумусоаккумулятивном горизонте почв возрастом более 50–60 лет: 1.7–3.2 vs. 0.4–1.0 (% М почвы) (залежные участки возрастом менее 50 лет) (табл. 4).

Изменение уровня накопления $C_{\text{ЛФ}}$ в исследуемом хроноряду прежде всего обусловлено заметным увеличением содержания углерода свободного ОБ ($C_{\text{СВ}}$) – от 0.1 до 0.6–1.9 (% М почвы) (табл. 4, рис. 2). Исключение отмечено лишь для почвы залежи сроком 20–25 лет, развивающейся под пологом березового леса. По-видимому, это обусловлено минимальным наблюдаемым проективным покрытием почвы по сравнению с остальными исследованными почвами, исключая почву под лугом (10–15 % vs. 25–30 ÷ 60–70 %) ([Комарова и др., 2018](#)).

Уровень накопления углерода фракции $\text{ЛФ}_{\text{АГР}}$ в почвах исследованного хроноряда также имеет тенденцию к увеличению в ряду: 20–25 лет < 10–20 лет < 50–60 лет < ельники (табл. 4, рис.2). Следует отметить, что в первые 20 лет уровень накопления данной фракции снижается, увеличение $C_{\text{ЛФ}}^{\text{АГР}}$ наблюдается лишь после 50 лет функционирования почв в режиме залежи. При исследовании залежных дерново-подзолистых почв Костромской области было зафиксировано увеличение $C_{\text{АГР}}$, начиная с 20 лет после вывода почв из активного сельскохозяйственного оборота ([Артемьева, 2017](#)). Однако в литературе имеются сведения и об

обратной тенденции ([Kalinina et al., 2013](#); [Artemyeva et al., 2018](#)). Следует отметить, что почвы залежей аккумулируют в 1.4–8 раз меньше $C_{\text{АГР}}$ по сравнению с почвами ельников разного видового состава.

Уровень накопления $C_{\text{Ил}}$ в гумусоаккумулятивных горизонтах в изученных почвах хроноряда колеблется в пределах от 0.3–0.5 % (М почвы) (разновременные залежные участки) до 0.8–1.1 % (М почвы) (ельники) (табл. 4). Наблюдается тенденция к увеличению дифференциации верхних горизонтов по содержанию $C_{\text{Ил}}$ в ряду разновременных залежных участков: луг (в 1.3 раза) < 10–15 лет (в 1.4 раза) ≤ 20–25 лет (в 1.4 раза) < 50–60 лет (в 1.5 раза) (табл. 4).

Содержание $C_{\text{Ост}}$, ОВ которого локализуется в устойчивых в УЗ-поле микроагрегатах в гумусоаккумулятивных горизонтах изученных почв хроноряда, колеблется в пределах от 0.31 до 0.68 % (М почвы), и это в 2.1–4.6 раза меньше по сравнению с ельниками разного видового состава (табл. 4, рис. 2). Это согласуется с литературными данными об увеличении $C_{\text{Ост}}$ в залежных почвах, начиная с 45–50 лет после прекращения функционирования агроценоза ([Артемьева, 2017](#); [Artemyeva et al., 2018](#)). Аналогичная тенденция увеличения содержания ОВ устойчивых агрегатов < 20 мкм отмечалась и при исследовании ОВ почв при смене характера землепользования на территории Баварии ([Leifeld, Kogel-Knabner, 2005](#)).

Таким образом, снижение уровня накопления углерода всех исследованных фракций в верхних горизонтах, за исключением илистой, в первые 20–25 лет после вывода почв из активного сельскохозяйственного оборота обусловлено тем, что масштаб восстановления естественной растительности не компенсирует недостаток свежего ОВ в результате сведения агроценоза. С увеличением сроков залежи прирост биомассы увеличивается и, начиная с 50 лет функционирования в режиме залежи, наблюдается устойчивый рост уровня накопления углерода всех исследованных фракций.

Состав компонентов ОВ гумусоаккумулятивных горизонтов. Анализ долевого участия углерода изучаемых фракций в составе $C_{\text{общ}}$ исследованных дерново-подзолистых почв хроноряда показал, что доля дискретного ОВ увеличивается по мере увели-

чения возраста залежи: 20–25 лет < 10–15 лет < 5–7 лет < 50–60 лет (табл. 5).

Следует отметить, что долевое участие дискретного ОВ в почвах ельников в 1.3–2.0 раза выше по сравнению с таковым разновозрастных залежных участков, достигает 57–65 % $C_{\text{общ}}$ (табл. 5).

Величина долевого участия $C_{\text{Ил}}$ в гумусоаккумулятивных горизонтах почв исследованного хроноряда, начиная с 50–60 лет, демонстрирует тенденцию к уменьшению: доля $C_{\text{Ил}}$ закономерно снижается с 42 до 16–24 % от $C_{\text{общ}}$ (табл. 5).

В целом, анализ распределения величины долевого участия $C_{\text{Ил}}$ и $C_{\text{Ост}}$ показал, что они отчетливо увеличиваются от гумусоаккумулятивного горизонта к нижележащим.

Запасы углерода в гумусоаккумулятивных горизонтах. Анализ распределения запасов углерода изучаемых фракций в слое 0–20 см исследованных дерново-подзолистых почв хроноряда продемонстрировал тенденцию к увеличению по мере увеличения срока функционирования в режиме залежи (табл. 6, рис. 3).

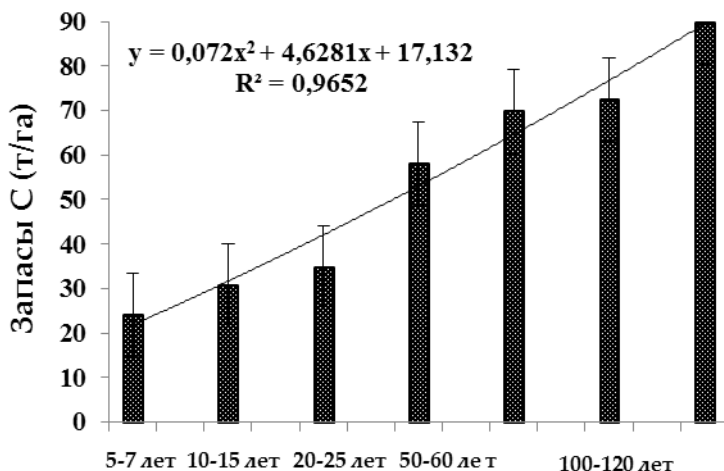


Рис. 3. Величина запасов углерода в слое 0–20 см дерново-подзолистых почв исследованного хроноряда (т/га).

Fig. 3. The carbon content ($t\ ha^{-1}$) in the 0–20 cm of the studied sod-podzolic soils.

Таблица 5. Распределение углерода органических и органо-минеральных фракций в дерново-подзолистых почвах исследованного хронологического ряда

Table 5. The carbon content (% of total C) in organic and organo-mineral fractions in studied sod-podzolic soils

Ценоз	Возраст, годы	Видовой состав	Горизонт	Глубина, см	Углерод, % C _{общ}			
					Легкие фракции пл. < 1.8 г/см ³		Ил	Остаток
					ЛФ _{СВ}	ЛФ _{АП}		
Залежь	5–7	Луговое разнотравье	A ₁	3–12	5.52 (0.02)	40.74 (2.62)	17.17 (0.26)	36.57 (2.38)
			A ₁ '	12–29			39.26 (1.07)	60.74 (1.07)
			A ₁ A ₂	29–35			43.34 (6.17)	56.66 (6.17)
	10–15	Береза	A ₁	3–15	9.15 (1.88)	31.27 (0.71)	26.71 (0.77)	32.88 (0.40)
			A ₁ A ₂	15–28			46.72 (1.28)	53.28 (1.28)
			A ₂	28–43			60.82 (3.86)	39.18 (3.86)
	20–25	Береза	A ₁	4–20	4.07 (0.37)	28.36 (0.56)	41.69 (2.94)	25.87 (3.13)
			A ₁ A ₂	20–26			56.65 (1.69)	43.35 (1.69)
			A ₂	26–40			68.07 (2.57)	31.21 (6.40)
	50–60	Береза + осина	A ₁	3–16	9.59 (1.07)	41.39 (0.07)	21.07 (0.82)	27.95 (0.18)
			A ₁ A ₂	16–30			45.21 (3.06)	54.79 (3.06)
			A ₂	30–44			60.17 (5.53)	39.83 (5.53)
Лес	100–120	Ельник чернично-разнотравный	A ₁	4–10	16.74 (0.26)	31.69 (0.82)	24.37 (1.29)	27.20 (0.74)
			A ₁ '	10–16			61.66 (1.20)	38.34 (1.20)
			A ₁ A ₂	16–26			60.09 (6.17)	39.91 (6.17)
	100–120	Ельник чернично-кисличный	A ₁	4–10	40.37 (0.89)	24.75 (0.05)	15.73 (0.02)	19.16 (0.96)
			A ₁ A ₂	10–20			49.06 (2.53)	50.94 (2.53)
			A ₂	20–30			49.53 (5.35)	50.47 (5.35)
	100–120	Ельник кислично-щитовниковый	A ₁	3–7	10.47 (0.39)	46.20 (0.15)	18.56 (0.04)	24.76 (0.50)
			A ₁ '	7–17			31.21 (0.57)	68.79 (0.57)
			A ₁ A ₂	17–32			55.93 (6.16)	44.07 (6.16)

Примечание: в скобках – доверительный интервал.

Таблица 6. Запасы углерода органических и органо-минеральных фракций в исследованных дерново-подзолистых почв хроноряда (слой 0–20 см)

Table 6. Carbon content ($t\ ha^{-1}$) in organic and organo-mineral fractions of the studied sod-podzolic soils (0–20 cm layer)

Ценоз	Возраст, годы	Видовой состав	Запасы С (т/га)					
			Легкие фракции, пл. < 1.8 г/см ³			Ил	Остаток	С _{общ}
			ЛФ _{СВ}	ЛФ _{АГР}	Σ			
Залежь	5–7	Луговое разнотравье	0.82 (0.00)	6.05 (0.39)	6.87 (0.39)	6.19 (0.03)	11.07 (0.01)	24.14 (0.43)
	10–15	Береза	1.51 (0.32)	5.14 (0.07)	6.65 (0.25)	12.01 (3.81)	11.93 (0.50)	30.58 (4.57)
	20–25	Береза	0.51 (0.08)	3.52 (0.15)	4.03 (0.22)	11.78 (0.56)	18.98 (1.19)	34.79 (1.98)
	50–60	Береза + осина	2.47 (0.29)	10.60 (0.05)	13.10 (0.34)	12.60 (0.31)	32.30 (0.27)	58.00 (0.38)
Лес	100–120	Ельник чернично-разнотравный	5.20 (0.34)	9.83 (0.24)	15.03 (0.58)	19.54 (0.46)	37.88 (1.94)	72.45 (2.98)
		Ельник чернично-кисличный	12.44 (0.37)	7.63 (0.07)	20.07 (0.45)	12.24 (0.22)	37.40 (0.39)	69.71 (0.17)
		Ельник кислично-щитовниковый	4.83 (0.35)	21.33 (0.80)	26.16 (1.15)	22.19 (0.31)	41.45 (1.03)	89.80 (2.49)

Примечание: в скобках – доверительный интервал.

Интересно, что начиная с 50–60 лет функционирования в режиме залежи отмечено устойчивое увеличение величин запасов дискретного ОВ и фракции Остатка, в котором локализуются устойчивые в УЗ-поле микроагрегаты.

Выявленная зависимость описывается полиномиальным уравнением второй степени с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.97$ при $P < 0.05$ (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лесовосстановление с течением времени приводит к накоплению мертвой биомассы, что способствует увеличению содержания наиболее чувствительных к изменению экологических условий легких фракций (ЛФ).

Материалы исследования с применением гранулоденсиметрического фракционирования почв свидетельствуют о том, что в почвах после выведения их из сельскохозяйственного производства происходят качественные и количественные изменения его гумусового состояния. В первые 20–25 лет после сведения агроценоза наблюдаются деградационные изменения гумусового состояния дерново-подзолистых почв, обусловленные отсутствием агротехнологических обработок и недостатком свежего ОВ культурных растений. Лишь по прошествии 50 лет функционирования в режиме залежи качественные и количественные показатели ОВ дерново-подзолистых почв начинают приближаться к таковым ельников возрастом более 100 лет. Это проявляется в увеличении количества дискретного ОВ, уровне накопления углерода данной фракции ОВ в почве и величине ее долевого участия в общем уровне накопления углерода в почве. Это согласуется с ранее полученными данными о восстановлении гумусового состояния дерново-подзолистой почвы 45-летнего возраста, ОВ которой практически достигло показателей, характерных для автоморфных почв естественных ценозов ([Артемьева и др., 2013](#); [Артемьева, 2017](#)).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Президиума РАН (грант на проведение фундаментальных исследований в 2018–2020 гг.) с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемяева З.С.* Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС, 2010. 240 с.
2. *Артемяева З.С., Федотов Г.Н.* Состав функциональных пулов легкоразлагаемого органического вещества автоморфных зонального ряда почв центра русской равнины // Вестник Московского университета. Сер.17. Почвоведение. 2013. № 4. С. 3–10.
3. *Артемяева З.С., Рыжова И.М., Силева Т.М., Ерохова А.А.* Стабилизация органического углерода в микроагрегатах дерново-подзолистых почв в зависимости от характера землепользования // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2013. № 3. С. 19–26.
4. *Артемяева З.С., Рыжова И.М., Силева Т.М., Подвезенная М.А.* Состав компонентов микроструктуры гумусовых и пахотных горизонтов дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 2014. № 2. С. 184–190.
5. *Артемяева З.С.* Некоторые особенности динамики качественного состава органического вещества дерново-подзолистых почв в период зарастания пашни лесом // Проблемы региональной экологии. 2017. № 2. С. 54–59.
6. *Баранова О.Ю.* Антропогенные изменения дерново-подзолистых почв и их эволюция при лесовозобновлении. Дисс. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 1987. 122 с.
7. *Баранова О.Ю., Номеров Г.Б., Строганова М.Н.* Изменение свойств пахотных дерново-подзолистых почв при зарастании лесом // Почвообразование в лесных биогеоценозах. М.: 1989. С. 60–78.
8. *Владыченский А.С., Телеснина В.М.* Сравнительная характеристика постагрогенных почв южной тайги в разных литологических условиях // Вестник МГУ. Сер. 17: Почвоведение. 2007. № 4. С. 3–10.
9. *Ерохова А.А., Макаров М.И., Моргун Е.Г., Рыжова И.М.* Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308–1314.

10. Комарова Т.В., Васенев И.И., Алилов Д.Р., Таллер Е.Б. Экологическая оценка сукцессионной динамики почвенных запасов углерода и потоков CO₂ в столетнем ряду зарастания залежи Центрально-Лесного заповедника // Электронный научно-производственный журнал “АгроЭкоИнфо”, 2018. № 3. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_367.doc.
11. Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О. и др. Потоки и пулы углерода в залежных землях Подмосковья // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв: Сб. научных трудов. М.: Наука, 2006. С. 271–284.
12. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Розанова Л.Н. и др. Многолетний мониторинг эмиссии CO₂ из дерново-подзолистой почвы: анализ влияния гидротермических условий и землепользования // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Прод. издание, Т. XXI. СПб.: Гидрометеиздат, 2007. С. 23–44.
13. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В. Изменение гумусового состояния дерново-подзолистой песчаной почвы при прекращении антропогенного воздействия // Доклады Российской академии с/х наук. 2002. № 6. С. 26–28.
14. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Плылова И.А. Изменение состава растительного покрова, морфологического строения почвенного профиля, содержания и запасов гумуса в окультуренной дерново-подзолистой глееватой суглинистой почве в процессе постагрогенной эволюции // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2011. № 22. С. 74–77.
15. Люри Д.И., Горячкин С.В. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 246 с.
16. Матинян Н.Н., Бахметова К.А., Алексеев С.С. постагрогенная трансформация почв, сформированных на контрастных по гранулометрическому составу породах // Гумус и почвообразование. С. Петербург – Пушкин, 2007. С. 52–60.
17. Россия в цифрах. 2017. Краткий статистический сборник. М.: Росстат, 2017. 511 с.
18. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов Костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307–317.
19. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мишин Д.М. Динамика свойств почв и состава

- растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.
20. *Фомина А.С.* Интенсивность протекания элементарных почвообразовательных процессов в дерново-подзолистой песчаной почве и пути дальнейшего использования залежных земель // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2009. № 13. С. 11–15.
21. *Artemyeva Z., Zigova A., Kirillova N., Štastný M., Holubík O., Podrázský V.* Evaluation of aggregate stability of Haplic Stagnosols using dynamic light scattering, phase analysis light scattering and color coordinates // Archives of Agronomy and Soil Science. 2017. Vol. 63. No. 13. P. 1838–1851.
22. *Artemyeva Z.S., Žigová A., Kirillova N.P., Štastný M.* Dynamics of organic matter in soils following a change in landuse on Permo-Carboniferous rocks in the Cesky Brod area (Czech Republic) // Acta Geodymica et Geomaterialia. 2018. Vol. 15. No. 4 (192), P. 339–348.
23. *Christensen B.T.* Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // Advances in Soil Science. 1992. Vol. 20. P. 1–90.
24. *Falkengen-Grerup U., ten Brink D.-J., Brunet J.* Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40–80 years of forest growth an agricultural soils // Forest Ecol. Manag. 2005. Vol. 225. P. 74–81.
25. *Guggenberger G., Zech W.* Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Region Huetar Norte, Costa Rica // Forest Ecology and Management. 1999. Vol. 124. P. 93–104.
26. *Hooker T.D., Compton J.E.* Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment // Ecol. Appl. 2003. Vol. 13. No. 2. P. 299–313.
27. *Kalinina, O., Goryachkin, S.V., Karavaeva, N.A., Lyuri, D.I., Najdenko, L., Giani, L.* Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern taiga of Russia: soil development, nutrient status, and carbon dynamics // Geoderma. 2009. Vol. 152. P. 35–42.
28. *Kalinina, O., Chertov, O., Dolgikh, A.V., Goryachkin, S.V., Lyuri, D.I., Vormstein, S., Giani, L.* Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisol: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2013. Vol. 152. P. 221–233.
29. *Kalinina, O., Goryachkin S.V., Lyuri, D.I., Giani, L.* Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // Catena. 2015. Vol. 129. P. 18–29.

30. *Leifeld J., Kogel-Knabner I.* Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use // *Geoderma*. 2005. Vol. 124. No. 1–2. P. 143–155.
31. *Li, X.J., Li, X.R., Wang, X.P. and Yang, H.T.* Changes in soil organic carbon fractions after afforestation with xerophytic shrubs in the Tengger Desert, northern China // *European Journal of Soil Science*. 2016. Vol. 67. No. 2. 184–195.
32. *Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Kuzyakov Ya.* Carbon pool and sequestration in former arable chernozems depending on restoration period // *Ekologija*. 2008. Vol. 54. No. 4. P. 232–238.
33. *Morris S.J., Bohm S., Haile-Mariam S., Paul E.A.* Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils // *Glob. Chang. Biol.* 2007. Vol. 13. P. 1145–1156.
34. *Paul E.A., Morris S.J., Six J., Paustian K., Gregorich E.G.* Interpretation of soil carbon and nitrogen dynamics in agricultural and afforested soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2003. Vol. 67. P. 1620–1628.
35. *Poepflau C., Don A.* Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe // *Geoderma*. 2013. Vol. 192. P. 189–201.
36. *Smal H., Olszewska M.* The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus // *Plant Soil*. 2008. Vol. 305. P. 171–187.
37. *Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P.* Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land // *Forest Ecol. Manag.* 2002. Vol. 169. P. 137–147.

REFERENCES

1. Artem'eva Z.S., *Organicheskoe veshchestvo i granulometricheskaya sistema pochvy* (Organic matter and granulometric system of the soil), Moscow: GEOS, 2010, 240 p.
2. Artem'eva Z.S., Fedotov G.N., Sostav funktsional'nykh pulov legkorazlagaemogo organicheskogo veshchestva avtomorfnykh zonal'nogo ryada pochv tsentra russkoi ravniny (the composition of functional pools of easily decomposable organic matter of automorphic zonal series of soils in the center of the Russian plain), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2013, No. 4, pp. 3–10.
3. Artem'eva Z.S., Ryzhova I.M., Sileva T.M., Erokhova A.A., Stabilizatsiya organicheskogo ugleroda v mikroagregatakh dernovo-podzolistykh pochv v zavisimosti ot kharaktera zemlepol'zovaniya (Stabilization of organic carbon

in microaggregates of sod-podzolic soils depending on the nature of land use), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17, Pochvovedenie*, 2013, No. 3, pp. 19–26.

4. Artem'eva Z.S., Ryzhova I.M., Sileva T.M., Podvezennaya M.A. Sostav komponentov mikrostruktury gumusovykh i pakhotnykh gorizontov dernovo-podzolistykh pochv (The composition of the microstructure components of humus and arable horizons of sod-podzolic soils), *Pochvovedenie*, 2014, No. 2, pp. 184–190.

5. Artem'eva Z.S., Nekotorye osobennosti dinamiki kachestvennogo sostava organicheskogo veshchestva dernovo-podzolistykh pochv v period zarastaniya pashni lesom (Some features of the dynamics of the qualitative composition of the organic matter of sod-podzolic soils during the period of arable land overgrowing with forest), *Problemy regional'noi ekologii*, 2017, No. 2, pp. 54–59.

6. Baranova O.Yu., *Antropogennye izmeneniya dernovo-podzolistykh pochv i ikh evolyutsiya pri lesovozobnovlenii. Dis. ... kand. biol. nauk* (Anthropogenic changes in sod-podzolic soils and their evolution during reforestation, Cand. biol. sci. thesis), Moscow, MGU, 1987, 122 p.

7. Baranova O.Yu., Nomerov G.B., Stroganova M.N., *Izmenenie svoystv pakhotnykh dernovo-podzolistykh pochv pri zarastanii lesom* (Change in the properties of arable sod-podzolic soils during forest overgrowing), In: *Pochvoobrazovanie v lesnykh biogeotsenozakh* (Soil formation in forest biogeocenoses), Moscow, 1989, pp. 60–78.

8. Vladychenskiy A.S., Telesnina V.M., *Sravnitel'naya kharakteristika postagrogennykh pochv yuzhnoi taigi v raznykh litologicheskikh usloviyakh* (Comparative characteristics of post-agrogenic soils of the southern taiga in different lithological conditions), *Vestnik MGU, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2007, No. 4, pp. 3–10.

9. Erokhova A.A., Makarov M.I., Morgun E.G., Ryzhova I.M., *Izmenenie sostava organicheskogo veshchestva dernovo-podzolistykh pochv v rezul'tate estestvennogo vosstanovleniya lesa na pashne* (The change in the composition of the organic matter of sod-podzolic soils as a result of natural restoration of the forest on arable land), *Pochvovedenie*, 2014, No. 11, pp. 1308–1314.

10. Komarova T.V., Vasenev I.I., Alilov D.R., Taller E.B., *Ekologicheskaya otsenka suksessionnoi dinamiki pochvennykh zapasov ugleroda i potokov SO₂ v stoletnem ryadu zarastaniya zalezhi Tsentral'no-Lesnogo zapovednika* (Environmental assessment of succession dynamics of soil carbon stocks and CO₂ fluxes in the centennial row of overgrowth of the Central Forest Reserve), *Elektronnyi nauchno-proizvodstvennyi zhurnal "AgroEkoInfo"*, 2018, No. 3, URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2018/3/st_367.doc.

11. Kurganova I.N., Ermolaev A.M., Lopes de Gerenyu V.O. et al., Potoki i puly ugleroda v zaleznykh zemlyakh Podmoskov'ya (Carbon streams and pools in the fallow lands of the Moscow Region), In: *Pochvennye protsessy i prostranstvenno-vremennaya organizatsiya pochv* (Soil processes and spatio-temporal soil organization), Moscow: Nauka, 2006, pp. 271–284.
12. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Rozanova L.N. et al., Mnogoletnii monitoring emissii CO₂ iz dernovo-podzolistoï pochvy: analiz vliyaniya gidrotermicheskikh uslovii i zemlepol'zovaniya (Long-term monitoring of CO₂ emissions from sod-podzolic soil: analysis of the influence of hydrothermal conditions and land use), In: *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* (Problems of environmental monitoring and modeling of ecosystems), Vol. XXI, St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2007, pp. 23–44.
13. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Chernov D.V., Izmenenie gumusovogo sostoyaniya dernovo-podzolistoï peschanoi pochvy pri prekrashchenii antropogennogo vozdeistviya (Changes in the humus state of sod-podzolic sandy soil upon termination of anthropogenic impact), *Doklady Rossiiskoi akademii s/kh nauk*, 2002, No. 6, pp. 26–28.
14. Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Plylova I.A., Izmenenie sostava rastitel'nogo pokrova, morfologicheskogo stroeniya pochvennogo profilya, sodержaniya i zapasov gumusa v okul'turennoi dernovo-podzolistoï gleevatoi suglinistoï pochve v protsesse postagrogennoi evolyutsii (Changes in the composition of the vegetation cover, the morphological structure of the soil profile, and the content and reserves of humus in the cultivated sod-podzolic gleyous loamy soil in the process of post-agrogenic evolution), *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2011, No. 22, pp. 74–77.
15. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., *Dinamika sel'skokhozyaistvennykh zemel' Rossii v KhKh veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* (The dynamics of agricultural land in Russia in the twentieth century and the post-agrogenic restoration of vegetation and soil), Moscow: GEOS, 2010, 246 p.
16. Matinyan N.N., Bakhmetova K.A., Alekseev S.S., Postagrogennaya transformatsiya pochv, sformirovannykh na kontrastnykh po granulometricheskomu sostavu porodakh (Post-agrogenic transformation of soils formed on rocks contrasting in terms of particle size distribution), In: *Gumus i pochvoobrazovanie* (Humus and soil formation), St. Petersburg – Pushkin, 2007, pp. 52–60.
17. Rossiya v tsifrah 2017 (Russia in numbers), *Kratkii statisticheskii sbornik* (Brief statistical compilation), Moscow: Rosstat, 2017, 511 p.

18. Ryzhova I.M., Erokhova A.A., Podvezennaya M.A., *Izmenenie zapasov ugleroda v postagrogennykh ekosistemakh v rezul'tate estestvennogo vosstanovleniya lesov Kostromskoi oblasti (The change in carbon reserves in post-hydrogen ecosystems as a result of natural restoration of forests in the Kostroma region)*, *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 307–317.
19. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M., *Dinamika svoystv pochv i sostava rastitel'nosti v khode postagrogennogo razvitiya v raznykh bioklimaticheskikh zonakh (Dynamics of soil properties and vegetation composition during post-agrogenic development in different bioclimatic zones)*, *Pochvovedenie*, 2017, No. 12, pp. 1514–1534.
20. Fomina A.S., *Intensivnost' protokaniya elementarnykh pochvoobrazovatel'nykh protsessov v dernovo-podzolistoi peschanoi pochve i puti dal'neishogo ispol'zovaniya zaleznykh zemel' (The intensity of the occurrence of elementary soil-forming processes in sod-podzolic sandy soil and ways of further use of fallow lands)*, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2009, No. 13, pp. 11–15.
21. Artemyeva Z., Zigova A., Kirillova N., Šťastný M., Holubík O., Podrázský V., *Evaluation of aggregate stability of Haplic Stagnosols using dynamic light scattering, phase analysis light scattering and color coordinates*, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, Vol. 63, No. 13, pp. 1838–1851.
22. Artemyeva Z.S., Žigová A., Kirillova N.P., Šťastný M., *Dynamics of organic matter in soils following a change in landuse on Permo-Carboniferous rocks in the Cesky Brod area (The Czech Republic)*, *Acta Geodymica et Geomaterialia*, 2018, Vol. 15, No. 4 (192), pp. 339–348.
23. Christensen B.T., *Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates*, *Advances in Soil Science*, 1992, Vol. 20, pp. 1–90.
24. Falkengen-Grerup U., ten Brink D.-J., Brunet J. *Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40-80 years of forest growth an agricultural soils*, *Forest Ecol. Manag.*, 2005, Vol. 225, pp. 74–81.
25. Guggenberger G., Zech W., *Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Region Huetar Norte, Costa Rica*, *Forest Ecology and Management*, 1999, Vol. 124, pp. 93–104.
26. Hooker T.D., Compton J.E., *Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment*, *Ecol. Appl.*, 2003, Vol. 13, No. 2, pp. 299–313.
27. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L., *Self-restoration of post-agrogenic sandy soils in the southern taiga of Russia: soil development, nutrient status, and carbon dynamics*, *Geoderma*, 2009, Vol. 152, pp. 35–42.

28. Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L., Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisol: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools, *Geoderma*, 2013, Vol. 152, pp. 221–233.
29. Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L., Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia, *Catena*, 2015, Vol. 129, pp. 18–29.
30. Leifeld J., Kogel-Knabner I., Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use, *Geoderma*, 2005, Vol. 124, No. 1–2, pp. 143–155.
31. Li X.J., Li X.R., Wang X.P., Yang H.T., Changes in soil organic carbon fractions after afforestation with xerophytic shrubs in the Tengger Desert, northern China, *European Journal of Soil Science*, 2016, Vol. 67, No. 2, pp. 184–195.
32. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Kuzyakov Ya., Carbon pool and sequestration in former arable chernozems depending on restoration period, *Ekologija*, 2008, Vol. 54, No. 4, pp. 232–238.
33. Morris S.J., Bohm S., Haile-Mariam S., Paul E.A., Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils, *Glob. Chang. Biol.*, 2007, Vol. 13, pp. 1145–1156.
34. Paul E.A., Morris S.J., Six J., Paustian K., Gregorich E.G., Interpretation of soil carbon and nitrogen dynamics in agricultural and afforested soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, Vol. 67, pp. 1620–1628.
35. Poeplau C., Don A., Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe, *Geoderma*, 2013, Vol. 192, pp. 189–201.
36. Smal H., Olszewska M., The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus, *Plant Soil*, 2008, Vol. 305, pp. 171–187.
37. Vesterdal L., Ritter E., Gundersen P., Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land, *Forest Ecol. Manag.*, 2002, Vol. 169, pp. 137–147.