

УДК 631.41

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.272>

Динамика пулов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги

© 2024 В. М. Телеснина , М. А. Подвезенная , И. М. Рыжова 

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Ленинские горы, 1/12, г. Москва, 119991, Россия. E-mail: vtelesnina@mail.ru

Цель исследования. Оценить характер изменения основных пулов углерода экосистем при постагрогенном восстановлении растительности для разных сельскохозяйственных угодий.

Место и время проведения. Исследования проводили в Костромской области. Объекты – хроноряды, представляющие собой зарастающую пашню, сенокос, сенокос-выгон и хорошо удобряемый частный огород.

Методы. Биомасса древостоя рассчитана аллометрически, живого напочвенного покрова – методом укосов (надземная) и монолитов (подземная). Содержание почвенного углерода определяли методом бихроматного окисления; микробную биомассу почвы оценивали методом субстрат-индуцированного дыхания.

Основные результаты. В течение сукцессии для пашен и сенокосов выявлено увеличение запасов углерода экосистемы за счёт роста древесной фитомассы, доля запасов углерода которой растёт от 0–10 до 65–78% за 40–50 лет. При зарастании удобренных огородов в течение 35 лет возобновления древостоя нет. В пахотном слое используемых в настоящее время почв содержится 0,83–1,05% органического углерода, в почве сенокосного луга – 2,25%, сенокосно-пастбищного луга – 3,97%, в почве огорода – 4,89%. При зарастании пашен запасы углерода в старопашотной толще увеличиваются от 2,0–2,6 до 3,0–5,0 кг С/м², при зарастании сенокосного луга – снижаются от 5,2 до 4,8 кг С/м², сенокоса-выгона – снижаются в 3,8 раза, огорода – за 35 лет практически не меняются (более 10 кг С/м²).

Заключение. При лесовосстановлении по пашням, а также сенокосам при отсутствии выпаса скота, запасы углерода экосистемы увеличиваются в 4–7 раз при уменьшении доли почвенного углерода. Направление и характер динамики пулов углерода определяется гумусным состоянием почвы в начале сукцессии и, как следствие, типом использования.

Ключевые слова: сукцессия; пашня; сенокос; почвенное органическое вещество; Albic Retisol; Retic Albic Podzol; подзолы; дерново-подзолистые почвы.

Цитирование: Телеснина В.М., Подвезенная М.А., Рыжова И.М. Динамика пулов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 3. e272. DOI: [10.31251/pos.v7i3.272](https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.272)

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий на территории России площадь сельскохозяйственных угодий, выведенных из использования, продолжает увеличиваться (Люри и др., 2010). На месте бывших агроценозов происходит постепенное восстановление исходной растительности (Kämpf et al., 2016), в результате чего в процессе демулационной сукцессии изменяются основные характеристики биологического круговорота и, как следствие, почти весь спектр почвенных свойств. На территории лесной зоны восстановление растительности сопровождается наиболее ярко выраженным трендом увеличения запасов общего углерода, аккумулируемого биогеоценозом, и его перераспределением в основных пулах – древостое, подстилке, минеральной части почвенного профиля. Лесовосстановление сопровождается аккумуляцией углерода преимущественно многолетними фракциями древесной фитомассы, в которой запас углерода превышает аналогичный показатель в минеральном профиле почвы в 1,5–3 раза (Рыжова и др., 2014; Телеснина, Жуков, 2019; Курганова и др., 2022).

Почвы в течение естественного лесовосстановления претерпевают изменения как морфологического строения профиля, так и физических, физико-химических и химических свойств, каждое из которых характеризуется своими особенностями динамики в зависимости от комплекса факторов. Морфологические признаки прошлого окультуривания в виде фрагментов пахотного горизонта могут присутствовать в течение более чем 100 лет (Kalinina et al., 2009). Как правило, по мере лесовосстановления повышается кислотность в верхней части профиля (Курганова и др., 2021), особенно после полного смыкания древостоя (Телеснина и др., 2016). Физико-химические свойства, такие как кислотность и сумма обменных оснований, наиболее динамичны и восстанавливаются быстро (Литвинович и др., 2004; Кечайкина и др., 2011), в отличие от гумусного состояния почвы.

Органофиль пахотной почвы, а также почвы, соответствующей луговой стадии залежи, принципиально отличается от органофилия почвы лесного фитоценоза. После прекращения распашки прекращается изъятие органического вещества с урожаем, на месте пашни поселяется разнотравно-злаковая растительность, которой свойственны высокая продуктивность надземной и, особенно, подземной части. В то же время постепенно затухает эффект последствия многолетнего внесения удобрений. При возобновлении древесной растительности, отличающейся принципиально другим составом наземного опада (Poeplau et al., 2011), появляется горизонт подстилки, который по мере сукцессии усложняется в строении и пространственной дифференциации, особенно если речь идет о возобновлении хвойных лесов (Телеснина и др., 2016). При этом увеличивается значение подстилок, как источника питательных веществ для растений (Kalinina et al., 2009). Доля запасов углерода подстилки составляет до 10% от общего запаса углерода в профиле почв (Владыченский и др., 2013; Kalinina et al., 2015). Сколь-либо существенная динамика содержания и запасов углерода в минеральной части профиля прослеживается только в верхней, старопахотной его части, особенно в верхней трети старопахотного горизонта (Kalinina et al., 2011). В легких почвах постагрогенная динамика запасов углерода выражена более отчетливо, чем в тяжелых, поскольку по мере лесовосстановления происходит перераспределение запасов органического вещества между подстилкой и минеральной частью профиля (Kalinina et al., 2010). Динамика содержания и запасов углерода в течение постагрогенного лесовосстановления может иметь разную направленность в зависимости от совокупности таких факторов, как нативные свойства почвы, характер сельскохозяйственного использования, регулярность внесения органических удобрений и, как следствие, гумусное состояние почвы на момент вывода из хозяйственного использования. Степень окультуренности также детерминирует направление динамики содержания углерода почвы по мере постагрогенного лесовосстановления – оно может уменьшаться в богатых гумусом, хорошо окультуренных почвах (Люри и др., 2010; Телеснина, Жуков, 2019), увеличиваться в малогумусных почвах любого гранулометрического состава (Рыжова и др., 2015; Овсепян, 2017; Курганова и др., 2019) или практически не меняться, если содержание углерода мало отличается от целинной почвы (Kalinina et al., 2013). Иначе говоря, при зарастании пашни лесом величина запасов углерода в почве стремится к стационарному состоянию, определенному их гранулометрическим составом и конкретными биоклиматическими условиями (Рыжова и др., 2014).

Почвенное органическое вещество представляет собой сложную кинетически гетерогенную систему, компоненты которой различаются по степени дисперсности и связи с минеральными компонентами. В.М. Семенов с соавторами (Семенов и др., 2023) предлагают выделять структурные и процессные пулы органического вещества. К структурным относятся пул, представленный грубыми твердыми органическими частицами размером 2–0,053 мм (Particulate Organic Matter, POM), и пул тонкодисперсных, связанных с минералами органических веществ размером менее 0,053 мм (Mineral-Associated Organic Matter, MAOM). Эти пулы принципиально отличаются условиями формирования, устойчивостью и особенностями функционирования (Lavallee et al., 2020). Предполагается, что POM характеризует почвенную секвестрацию углерода, а MAOM – депонирование углерода в почве, направленное на предотвращение его быстрого возвращения в атмосферу. К процессным пулам, характеризующим эмиссионную функцию почв, относят потенциально-минерализуемое органическое вещество и углерод микробной биомассы. При восстановлении почв в процессе сукцессии пулы органического вещества почв ведут себя по-разному, поэтому имеет смысл исследовать их динамику отдельно. В ряде работ показано, что наиболее чувствительными индикаторами изменений состава органического вещества почв является содержание лабильных пулов (Мамонтов и др., 2008; Когут, 2003; Семенов и др., 2006). Наибольшее накопление углерода лабильных пулов органического вещества связано с поступлением свежего растительного опада, который стимулирует активные микробиологические процессы (Овсепян, 2018; Артемьева и др., 2013).

Для понимания механизмов динамики углеродного баланса экосистемы в ходе постагрогенного восстановления естественной растительности, а также потенциала секвестрации и депонирования углерода, необходимо комплексное изучение динамики всех углеродсодержащих компонентов экосистемы – растительности, наземного детрита, а также разных пулов органического вещества почв. Цель настоящей работы – оценить динамику основных пулов углерода экосистем при естественном постагрогенном восстановлении растительности на примере хронорядов, характеризующих зарастание земель разных типов сельскохозяйственного использования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в Костромской области на территории Парфеньевского и Мантуровского районов, для которых характерны факторы почвообразования, типичные для южной тайги. Естественная растительность на плакорах представлена еловыми травяно-кустарничковыми лесами (Огуреева, 1991). Территория относится к северо-восточной подобласти атлантико-континентальной лесной области. Среднегодовая температура воздуха – 2,1°C, среднегодовое количество осадков – 564 мм. Почвообразующие породы представлены моренными и флювиогляциальными отложениями (Болысов, Фузеина, 2001). Объектами исследования выбраны хроноряды, характеризующие зарастание земель разных типов хозяйственного использования (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика изучаемых хронорядов

Стадия сукцессии, возраст	Координаты	Растительность	Почва*
1	2	3	4
Парфеньевский район, зарастающая пашня			
Пашня	N 58°40'33,7" E 43°18'35,4"	Посевы овса (<i>Avena sativa</i>)	Агродерново-подзолистая глееватая среднепахотная легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Stagnic, Loamic, Ochric) (P-BELg-BTg-BTCg)
Залежь 7–11 лет	N 58°40'38,1" E 43°18'36,0"	Луг с преобладанием мятлика лугового (<i>Poa pretense</i>) и ромашника непахучего (<i>Tripleurospermum inodorum</i>), с редким подростом сосны (<i>Pinus sylvestris</i>)	Агродерново-подзолистая реградирующая глееватая среднепахотная легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Stagnic, Loamic, Ochric) (Pw-BELg-BTg-BTCg)
Залежь 20–24 лет	N 58°40'23,5" E 43°18'16,3"	Подрост сосны, березы (<i>Betula pendula</i>) и ивы козьей (<i>Salix caprea</i>), в травостое преобладают мятлик луговой и зверобой продырявленный (<i>Hypericum perforatum</i>)	Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Stagnic, Loamic, Ochric) (Pw-AELg-BELg-BTg)
Лес вторичный 40–50 лет	N 58°40'24,1" E 43°18'22,4"	Елово-сосновый (<i>Picea abies</i> – <i>Pinus sylvestris</i>) лес с преобладанием в напочвенном покрове Иван-чая узколистного (<i>Chamaenerion angustifolium</i>) и земляники лесной (<i>Fragaria vesca</i>)	Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Stagnic, Loamic, Ochric) (AYpa-AELg-BELg-BTg)
Лес 80–100 лет	N 58°40'40,9" E 43°18'24,0"	Сосново-еловый (<i>Pinus sylvestris</i> - <i>Picea abies</i>) лес с преобладанием в напочвенном покрове марьянника лесного (<i>Melampyrum sylvaticum</i>) и грушанки круглолистной (<i>Pyrola rotundifolia</i>)	Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Stagnic, Loamic, Ochric) (AYpa-ELg-BELg-BTg-BTCg)
Мантуровский район, зарастающая пашня			
Пашня	N 58°10'55,0" E 44°28'27,8"	Посевы овса	Агродерново-подзол литобарьерный среднепахотный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endolloamic, Raptic, Ochric) (P-AE-BE-B-BC)
Залежь 7–9 лет	58°10'52,7" 44°28'23,1"	Луг с преобладанием овсяницы красной (<i>Festuca rubra</i>), ежи сборной (<i>Dactylis glomerata</i>) и ястребинки зонтичной (<i>Hieracium umbellatum</i>)	Агродерново-подзол реградируемый литобарьерный среднепахотный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endolloamic, Raptic, Ochric) (AYpa-AE-BE-B)

1	2	3	4
Залежь 12–15 лет	58°10'52,8" 44°28'21,0"	Молодой древостой из ивы козьей с преобладанием в травостое овсяницы красной (<i>Festuca rubra</i>), ситника нитевидного (<i>Juncus filiformis</i>) и грушанки круглолистной	Агродерново-подзол реградируемый литобарьерный среднепахотный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Raptic, Ochric) (AYpa-AE-BEg-Bg)
Лес вторичный 45 лет	58°10'54,0" 44°28'21,6"	Осиново-березовый (<i>Populus tremula</i> – <i>Betula pendula</i>) лес, в напочвенном покрове черника (<i>Vaccinium myrtillus</i>)	Дерново-подзол постагрогенный литобарьерный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Raptic, Ochric) (O-AYpa-AE-BE-B)
Лес 100 лет	58°10'56,1" 44°28'29,0"	Лес березово-еловый (<i>Betula pendula</i> – <i>Picea abies</i>) мохово-черничный	Подзол грубогумусированный литобарьерный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Raptic) (O-AH-AE-E-BE-B)
Мантуровский район, зарастающий сенокос			
Луг, не косимый 2- 3 года	58°12'02,79" 44°25'31,02"	Луг с преобладанием зверобоя продырявленного и Иван-чая	Агродерново-подзолистая реградируемая среднепахотная легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Loamic, Ochric) (AYpa-EL-BEL-BT)
Луг, не косимый 13 лет	58°12'07,47" 44°25'37,62"	Смешанный древостой с преобладанием березы, в травяном ярусе доминируют ястребинка зонтичная и манжетка обыкновенная (<i>Alchemilla sp.</i>)	Агродерново-подзолистая реградируемая среднепахотная легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Loamic, Ochric) (AYpa-EL-BEL-BT)
Лес вторичный 20-22 лет	58°12'08,30" 44°25'34,48"	Ивово-березовый (<i>Salix caprea</i> – <i>Betula pendula</i>) лес, в напочвенном покрове папоротники и щучка дернистая (<i>Deschampsia caespitosa</i>)	Дерново-подзолистая постагрогенная легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Loamic, Ochric) (AYpa-EL-BEL-BT)
Лес 95 лет	58°12'01,14" 44°25'36,3"	Березово-еловый (<i>Betula pendula</i> – <i>Picea abies</i>) лес, в напочвенном покрове грушанка круглолистная и костяника (<i>Rubus saxatilis</i>)	Дерново-подзолистая легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых мореной / Albic Retisol (Loamic, Ochric) (AYpa-EL-BEL-BT)
Мантуровский район, зарастающий огород			
огород	58°10'38,18" 44°28'38,74"	Посадки – тыква (<i>Cucurbita pepo</i>), лук (<i>Allium sativum</i>)	Агрозем альфегумусовый среднепахотный супесчаный на ледниковых отложениях / Plaggic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Raptic, Humic) (P-AE-B)
Залежь 4 года	58°10'38,88" 44°28'34,06"	Заросли крапивы двудомной (<i>Urtica dioica</i>)	Агрозем альфегумусовый среднепахотный реградируемый супесчаный на ледниковых отложениях / Plaggic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Raptic, Humic) (AYpa-AE-B)
Залежь 10 лет	58°10'38,69" 44°28'33,66"	Заросли крапивы двудомной и малины (<i>Rubus idaeus</i>)	Агрозем альфегумусовый среднепахотный реградируемый супесчаный на ледниковых отложениях / Plaggic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Raptic, Humic) (AYpa-AE-B)
Залежь 20 лет	58°10'36,10" 44°28'38,53"	Травяное сообщество с преобладанием костра безостого (<i>Bromopsis inermis</i>) и бодяка полевого (<i>Cirsium arvense</i>)	Агрозем альфегумусовый среднепахотный реградируемый супесчаный на ледниковых отложениях / Plaggic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Raptic, Humic) (AYpa-AE-B)

1	2	3	4
Залежь 35 лет	58°10'38,10" 44°28'33,71"	Травяное сообщество с преобладанием сныти обыкновенной (<i>Aegopodium podagraria</i>), бодяка полевого и крапивы двудомной	Агрозем альфегумусовый среднепахотный реградированный супесчаный на ледниковых отложениях / Plaggic Podzol (Anoarenic, Endolloamic, Raptic, Humic) (AYpa-AE-B)
Мантуровский район, зарастающий выгон-сенокос			
Выгон-сенокос	58°10'31,59" 44°28'33,34"	Луг косимый с преобладанием одуванчика лекарственного (<i>Taraxacum officinale</i>) и ежи сборной (<i>Dactylis glomerata</i>)	Агродерново-подзол реградированный литобарьерный среднепахотный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endolloamic, Raptic, Ochric) (AYpa(0-30) - EBF(30-46) -BF(46-90))
Залежь 10 лет	58°10'29,37" 44°28'33,64"	Луг с преобладанием ежи сборной и тысячелистника обыкновенного (<i>Achillea millefolium</i>). Отдельные яблони (<i>Malus domestica</i>) и рябины (<i>Sorbus aucuparia</i>) высотой до 2 м	Агродерново-подзол реградированный литобарьерный среднепахотный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endolloamic, Raptic, Ochric) (AYpa(0-30)- EBF(30-50)-BF(50-90))
Вторичный лес 25 лет	58°10'30,88" 44°28'27,05"	Березняк сомкнутость крон 0,4, в травостое преобладают подмаренник мягкий (<i>Gallium mollugo</i>) и овсяница красная	Дерново-подзол постагрогенный литобарьерный супесчаный на ледниковых отложениях / Retic Albic Podzol (Anoarenic, Endolloamic, Raptic, Ochric) (O(0-2)-AYpa(2-30) - BF (30-80)-BC(80-100))

Примечание.

* – названия почв даны в соответствии с классификацией почв России (Классификация ..., 2004) и классификацией IUSS Working Group WRB (2014).

Парфеньевский район. Изучаемый хроноряд расположен на выровненном водоразделе р. Соег (бассейн р. Нея). Почвообразующими породами являются покровные суглинки, подстилаемые мореной. Все пробные площадки размером 20×20 м были заложены на водоразделе на расстоянии 100–250 м друг от друга. Хроноряд характеризует следующие стадии: 1 – пашню (посев овса), 2 – разнотравно-злаковый луг (залежь 7–11 лет), 3 – молодой лес с густым травяным покровом (залежь около 20 лет), 4 – лес 45–50 лет и 5 – вторичный ельник (около 100 лет).

Мантуровский район. Один из хронорядов, представляющий собой зарастающую пашню, расположен в 1–2 км от русла р. Унжи. Почвообразующие породы – озерно-ледниковые пески, подстилаемые на разной глубине (70–80 см) тяжелыми глинами. Стадии зарастания: 1 – пашня, 2 – залежь 7–9 лет, 3 – залежь 12–15 лет, на которой сформирован молодой древостой из ивы козьей, 4 – мелколиственный вторичный лес 45 лет, 5 – берёзово-еловый лес 100 лет. Выбранные площадки площадью 20 х 20 м расположены не более чем в 100 м друг от друга и соответствуют одному элементу мезорельефа – приводораздельному склону.

Примерно в 500 м от зарастающей пашни в деревне Выползово расположен частный огород, разные участки которого прекратили использовать от 4 до 35 лет назад. Это один из вариантов демулационной сукцессии, так как почва огорода, в отличие от пашни, много лет подвергалась внесению навоза (около 20 т/га) и золы (около 5 т/га). Стадии зарастания представлены действующим огородом (0-стадия) и огородами, заброшенными 4, 10, 20 и 35 лет назад.

Следующий хроноряд находится также в деревне Выползово и представляет собой зарастающий сенокос, отличающийся многоэтапной историей сельскохозяйственного освоения. Ранее (начало 20 в.) распаханная территория в течение нескольких десятилетий до начала 90-х годов была колхозным выгоном для крупного рогатого скота, а с 1991 г. используется исключительно как сенокос, площадь которого из года в год сокращается. Зоны зарастания: 1) действующий сенокос; 2) луг, не косимый 10 лет; 3) вторичный березняк примерно 25 лет, образованный на месте луга. Разные зоны зарастания расположены менее чем в 50–100 м друг от друга.

Фоновым (контрольным) участком для двух последних хронорядов, как и для зарастающей пашни, является 100-летний березово-еловый лес, на месте которого, по меньшей мере, 120 лет не было распашки, кошени и выпаса.

Ещё один хроноряд расположен в 7 км от русла р. Унжи (в пределах водораздельного пространства) и представляет собой зарастающий сенокосный луг, на котором, в отличие от

предыдущего хроноряда, никогда не проводили выпас скота. Почвообразующие породы – опесчаненные покровные суглинки, подстилаемые среднетяжёлыми моренными суглинками на глубине 30–35 см. Эта территория в 70–80-х годах использовалась несколько лет как пашня, далее – как сенокос. В начале 90-х годов площадь сенокоса стали сокращать, в результате неиспользуемая территория стала зарастать лесом. Стадии зарастания: 1 – луг, не косившийся 2–3 года, 2 – луг, зарастающий древостоем, не косившийся около 13 лет, 3 – мелколиственный вторичный лес 20–22 лет, 4 – лес 95 лет. Заложенные площадки расположены менее чем в 100-150 м друг от друга. Характеристика изучаемых рядов представлена в таблице 1.

Названия почв даны в соответствии с классификацией почв России (Классификация ..., 2004) и классификацией IUSS Working Group WRB (2014).

На участках, соответствующих всем стадиям зарастания, проводили геоботанические описания на площади 20×20 м. Биомассу древостоя и его фракций (корни, стволы, ветви, ассимилирующая часть) рассчитывали аллометрически (Замолодчиков и др., 2005; Уткин и др., 1996) исходя из высоты, диаметра и видовой принадлежности каждого дерева.

Надземную биомассу (с пересчетом на абсолютно сухую, высушено при 90°C) живого напочвенного покрова определяли методом укусов (повторность пятикратная, площадь отбора 50×50 см), подземную (также с пересчетом на абсолютно сухую) – методом монолитов на глубине 0–30 см с площади 10×10 см (повторность пятикратная). Пересчет запасов фитомассы в запасы углерода осуществляли с использованием литературных данных (Пристова, 2022). Лесную подстилку отбирали в девятикратной повторности с площадок 25×25 см с помощью рамки.

Пересчет запасов подстилки на запасы углерода осуществляли с помощью коэффициентов (Щепаченко и др., 2013).

На каждой стадии сукцессии, помимо почвенного разреза, для отбора образцов закладывали прикопки в пятикратной повторности, вскрывающие старопахотную толщу глубиной 30 см. Общий органический углерод ($C_{\text{орг}}$) почвы определяли методом Тюрина (Аринушкина, 1970). Для оценки структурных (свободного (РОМ) и связанного с минералами (МАОМ)) пулов органического вещества почв использовали результаты гранулоденсиметрического фракционирования почв хроноряда зарастающей пашни в Парфеньевском районе, опубликованные в статье А.А. Ероховой с соавторами (Ерохова и др., 2014). Они получены в соответствии с методикой, изложенной в работе Е.Г. Моргуна и М.И. Макарова (Моргун, Макаров, 2011), позволяющей выделять в малоизмененном состоянии разные фракции органического вещества почв по размеру частиц и плотности. Запасы почвенного органического углерода определяли по формуле:

$$C \text{ (кг C/m}^2\text{)} = C_{\text{орг}} \times h \times \rho \times 0,1$$

где $C_{\text{орг}}$ – содержание общего органического углерода в почве, %; h – мощность слоя, для которого определяется запас, см; ρ – плотность почвы, г/см³.

Содержание углерода микробной биомассы определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (Anderson, Domsch, 1978) в почвенных образцах после внесения 1 мл раствора глюкозы из расчета 10 мг глюкозы на 1 г почвы и рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{mic}} = 40,04 \times \text{VSIR} + 0,37$$

где VSIR – субстрат-индуцированное дыхание, мкл CO₂/(г почвы в час).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изученные хроноряды различаются скоростью возобновления древесной растительности и ее составом, которые зависят от комплекса факторов, таких как гранулометрический состав почв, история сельскохозяйственного освоения, обогащенность почв элементами питания и, в значительной мере, удаленность от источника семян деревьев (Люри и др., 2010; Морозов, Николаева, 2013). Сразу после прекращения распашки или кошения и в течение первых лет изученные залежи по пашне и сенокосам представляют собой луговые сообщества, через 7–8 лет появляются единичные всходы деревьев. Массовое возобновление древостоя для обеих зарастающих пашен выявлено через 13–20 лет после прекращения распашки. К 40–50 годам биомасса древостоя и, как следствие, запасы аккумулированного в нем углерода, увеличиваются в 3–5 раз, главным образом, за счёт надземной многолетней биомассы, а именно стволов и ветвей (рис. 1).

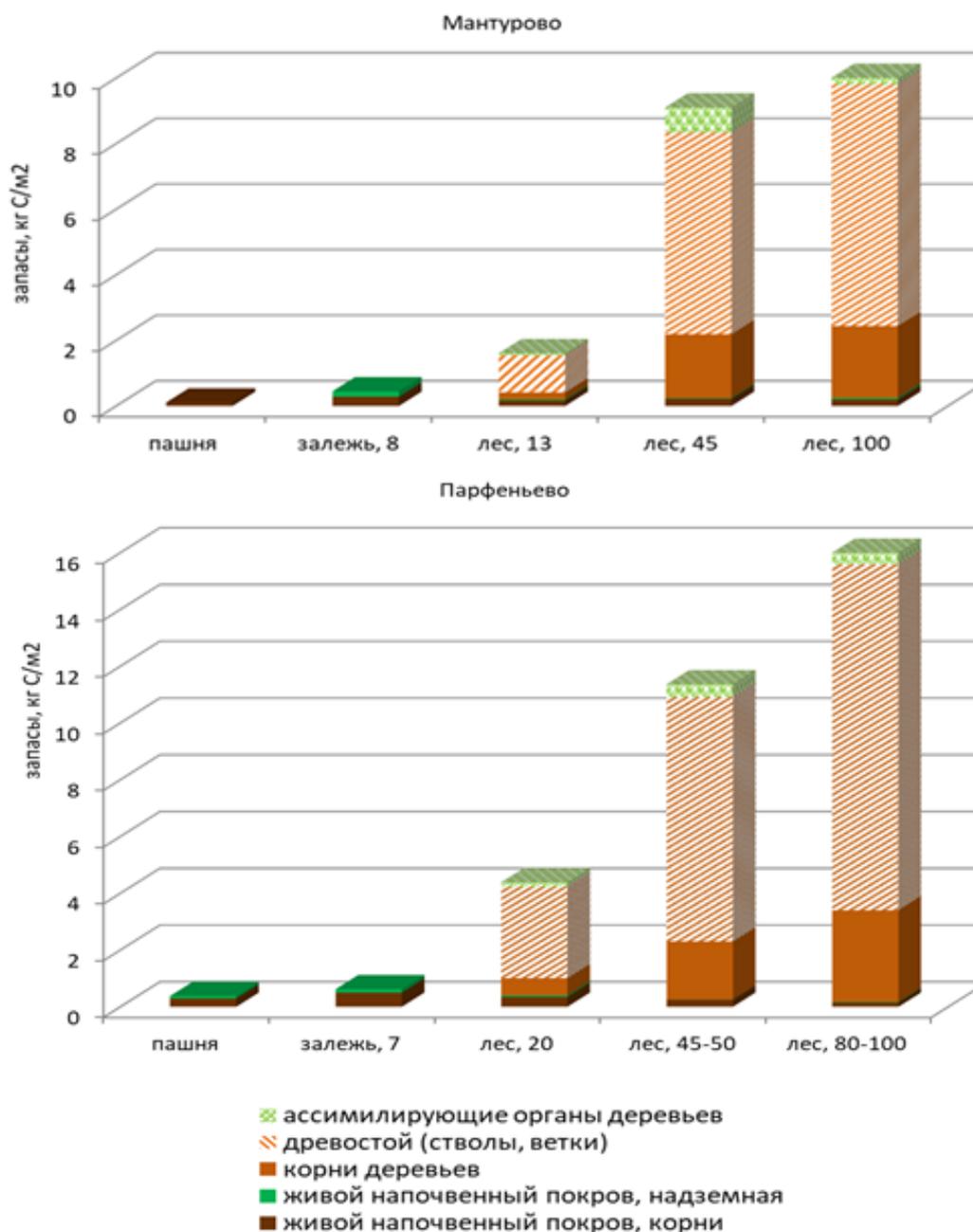


Рисунок 1. Запасы углерода фракций фитомассы при зарастании пашни лесом.

При зарастании луга, где сенокос не сопряжён с выпасом (рис. 2), наблюдается в целом та же тенденция, однако на стадии 13-летней залежи запасы углерода древостоя почти в 10 раз меньше, чем на аналогичной стадии зарастания пашни (соответственно 0,45 и 3,9 кг/м²), при том что состав пород многообразнее (ель, сосна, берёза, осина, серая ольха) – возможно, имеет значение быстрый рост породы козьей, соответствующей ранней стадии сукцессии на пашне. На сенокосно-пастбищном лугу (см. рис. 2) возобновление древостоя отличается – на залежи 10 лет встречаются отдельные низкорослые (не более 1,5 м) деревья и кустарники, не типичные для постагрогенной сукцессии – яблоня, рябина, шиповник.

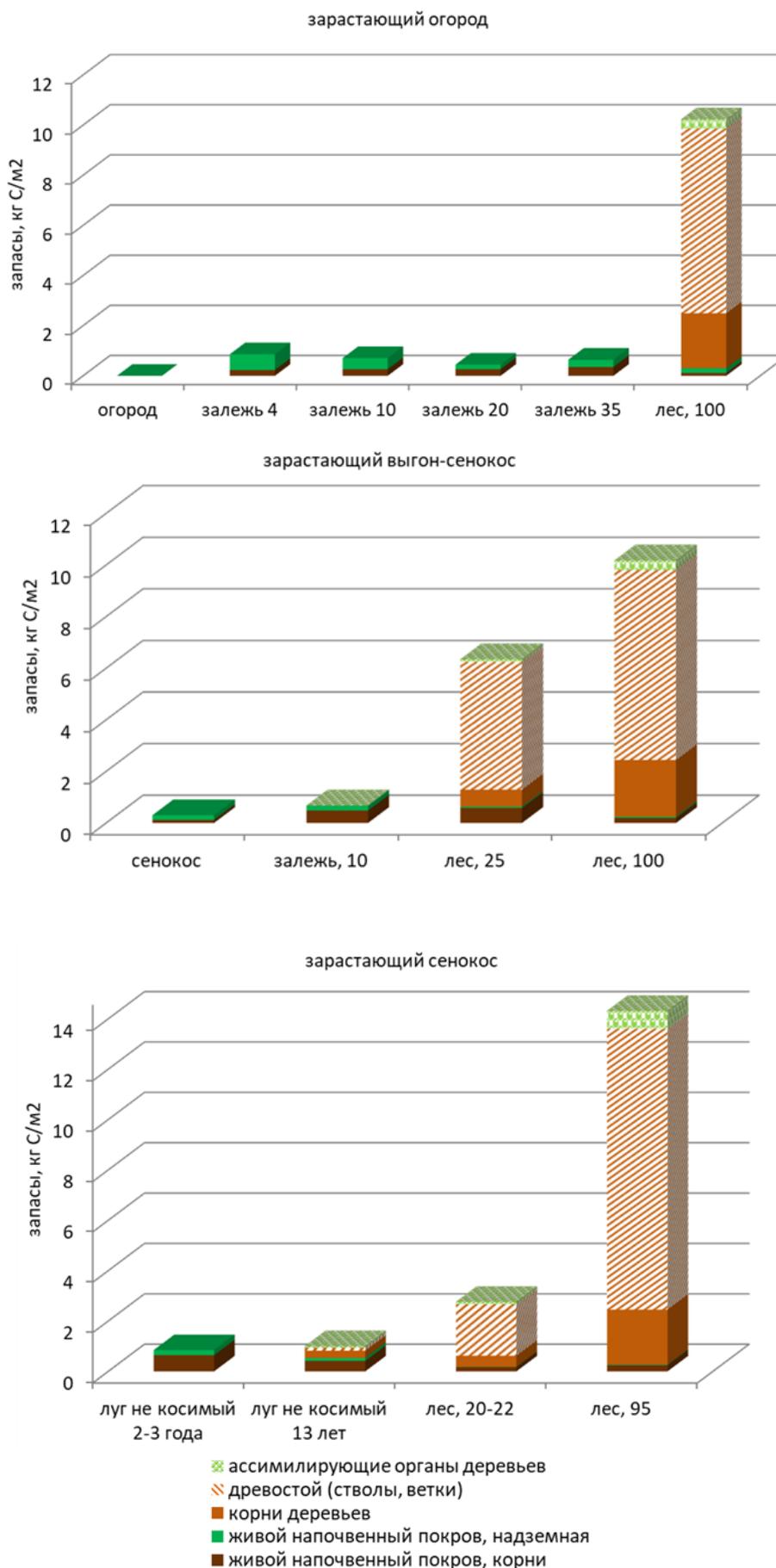


Рисунок 2. Изменение запасов углерода фракций фитомассы при естественном восстановлении экосистем на огороде и сенокосах Мантуровского района.

Только на 25-летней залежи произрастает сомкнутый берёзовый лес, запасы углерода в древостое которого ($5,7 \text{ кг/м}^2$) превышают в 1,5–2 раза аналогичный показатель для вторичного леса того же возраста, относящегося к зарастающей пашне (Парфеньевский) и зарастающему сенокосу (Мантуровский). Что касается огорода (см. рис. 2), то через 35 лет после прекращения его использования возобновления деревьев и кустарников все ещё нет. Выявлены определенные различия в постагрогенной динамике запасов углерода, содержащихся в надземной и подземной частях живого напочвенного покрова. Максимальная биомасса и, соответственно, запасы углерода в надземной части живого напочвенного покрова, представленного травостоем, выявлены для зарастающего огорода в течение всех наблюдаемых стадий сукцессии (от 4 до 35 лет). При этом в течение сукцессии уменьшения запасов углерода в травостое не наблюдалось – через 20 лет после вывода из использования он составляет $0,2\text{--}0,3 \text{ кг/м}^2$, что соответствует начальным стадиям зарастания (до 10 лет) в других постагрогенных хронорядках. На зарастающих пашнях и сенокосах в первые 2–8 лет запас углерода, аккумулируемый биомассой травостоя, составляет $0,1\text{--}0,2 \text{ кг/м}^2$, затем к 13–20 годам снижается на порядок. Что касается подземной биомассы травяного (травяно-кустарничкового) яруса, какого-либо тренда в течение постагрогенной сукцессии для изученных хронорядов нет. В целом в течение естественного постагрогенного восстановления растительности для пашен и сенокосов выявлено увеличение запасов углерода в экосистеме за счёт роста фитомассы (главным образом, многолетних частей древостоя), доля запаса углерода которой от общего пула углерода экосистемы составляет от 0–10% в начале сукцессии до 65–78% через 40–50 лет после прекращения сельскохозяйственного использования. В ненарушенных субклимаксных лесных сообществах доля углерода, аккумулируемого биомассой, составляет 70–75%. Это не относится к зарастающему частному огороду, где в течение как минимум 35 лет при отсутствии возобновления деревьев основной пул углерода по-прежнему сосредоточен в минеральной части почвенного профиля (см. рис. 2). В зависимости от типа предыдущего сельскохозяйственного использования гумусовые горизонты почв могут существенно различаться по свойствам. Почва в пахотном слое характеризуется низким содержанием $C_{\text{орг}}$ ($0,83\text{--}1,05\%$). Содержание углерода в верхнем минеральном горизонте почвы сенокоса без дополнительного внесения удобрений составило 2,25%. На выгоне-сенокосе, где происходило естественное обогащение навозом, содержание $C_{\text{орг}}$ в почве увеличивается до 3,97%, а на удобряемом огороде до 4,89%. Так как динамика содержания углерода при естественном зарастании лесом зависит от их состояния в начальный момент, она различается в изучаемых хронорядках.

В процессе восстановления леса на пашне, содержание углерода в верхнем минеральном слое почв мощностью 10 см возрастает при переходе от пашни к лесу (80–100 лет) в 4 раза. При зарастании сенокоса содержание углерода в верхнем минеральном слое почв сначала снижается, но начиная со стадии вторичного молодого леса (20–22 года) вновь возрастает и в почве 95-летнего леса оно достигает такой же величины, что и в почве сенокоса. На выгоне в содержании углерода в верхнем слое почвы отмечается снижение на 40% и возврат к исходной величине в контрольном лесу. Динамика содержания органического углерода в верхнем слое почвы зарастающего огорода характеризуется его медленным уменьшением. На 35-летней залежи содержание углерода составляет 84% от исходного значения.

Плотность почвы в старопашотной толще также изменяется по мере сукцессии. Наиболее четкий тренд уменьшения плотности был выявлен ранее для почв зарастающей пашни, образованных на лёгких отложениях (Телеснина и др., 2016). После непродолжительного повышения плотности на ранних стадиях сукцессии (от $1,06$ до $1,15 \text{ г/см}^3$) наблюдается снижение до $0,89 \text{ г/см}^3$, что соответствует появлению сомкнутого древостоя.

На изменения запасов углерода в профиле почв в ходе естественного восстановления леса на землях, выведенных из сельскохозяйственного оборота, кроме изменений в его содержании влияют изменения морфологии и плотности почв. Поэтому важно изучать не только динамику содержания органического углерода, но и его запасов. Динамика запасов органического углерода в верхнем минеральном слое почвы мощностью 30 см определяется типом предыдущего использования земель (табл. 2). При зарастании пашни запасы углерода в верхнем минеральном слое почв мощностью 30 см увеличиваются в изучаемых рядах от $2,0\text{--}2,6$ до $3,0\text{--}5,0 \text{ кг С/м}^2$, после чего снова происходит некоторое снижение при формировании хвойного древостоя. При восстановлении леса на землях сенокоса они слабо снижаются от $5,2$ до $4,8 \text{ кг С/м}^2$ и значительно (в 3,9 раза) на выгоне. При зарастании почв огорода за 35 лет запасы углерода практически не изменились и составляют $11,6 \text{ кг С/м}^2$.

Таблица 2

Динамика запасов органического углерода в старопашотной толще в ходе постагрогенной сукцессии

Хроноряд	Стадия сукцессии	Запасы органического углерода, кг С/м ² в слое 0–30 см (среднее ± ошибка среднего)
Парфеньевский район		
Зарастающая пашня	Действующая пашня	2,0 ± 0,03
	Залежь 7 лет	2,8 ± 0,10
	Залежь 20 лет	3,3 ± 0,08
	Лес 40-50 лет	3,0 ± 0,10
	Лес 80-100 лет	2,2 ± 0,13
Мантуровский район		
Зарастающая пашня	Действующая пашня	2,6 ± 0,07
	Залежь 8 лет	3,1 ± 0,05
	Залежь 13 лет	4,2 ± 0,05
	Лес 45 лет	5,0 ± 0,24
	Лес 100 лет	3,3 ± 0,20
Зарастающий огород	Действующий огород	11,3 ± 0,25
	Залежь 4 года	11,2 ± 0,70
	Залежь 10 лет	9,9 ± 1,20
	Залежь 20 лет	10,0 ± 1,20
	Залежь 35 лет	11,6 ± 0,90
	Лес 100 лет	3,3 ± 0,20
Зарастающий сенокос	Луг, не косимый 2-3 года	5,2 ± 0,62
	Луг, не косимый 13 лет	3,4 ± 0,68
	Лес 20-22 года	4,1 ± 0,36
	Лес 95 лет	4,8 ± 0,38
Зарастающий сенокос (в прошлом выгон)	Действующий сенокос	12,9 ± 0,9
	Залежь 10 лет	9,9 ± 1,2
	Лес 25 лет	6,2 ± 0,2
	Лес 100 лет	3,3 ± 0,2

Особый интерес вызывают изменения в структуре запасов углерода постагрогенных экосистем, которые характеризуют диаграммы, представленные на рисунках 3 и 4. Во всех хронорядах при переходе от агроэкосистем к лесным экосистемам 80–100-летнего возраста уменьшается доля почвенного углерода и возрастает доля углерода фитомассы, хотя хроноряды различаются по динамике этого соотношения.

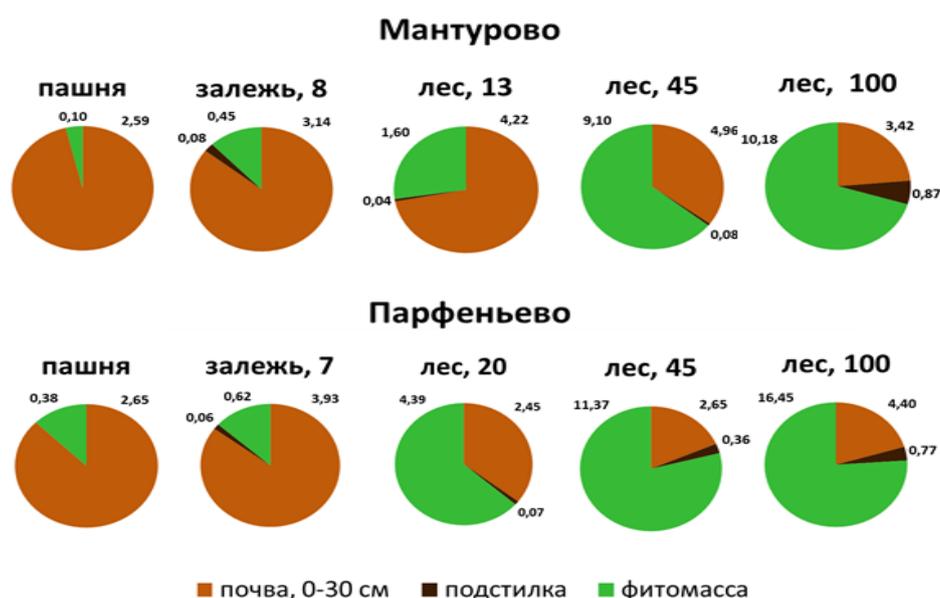


Рисунок 3. Структура запасов углерода (кг/м²) в постагрогенных экосистемах южной тайги при зарастании пашни лесом.

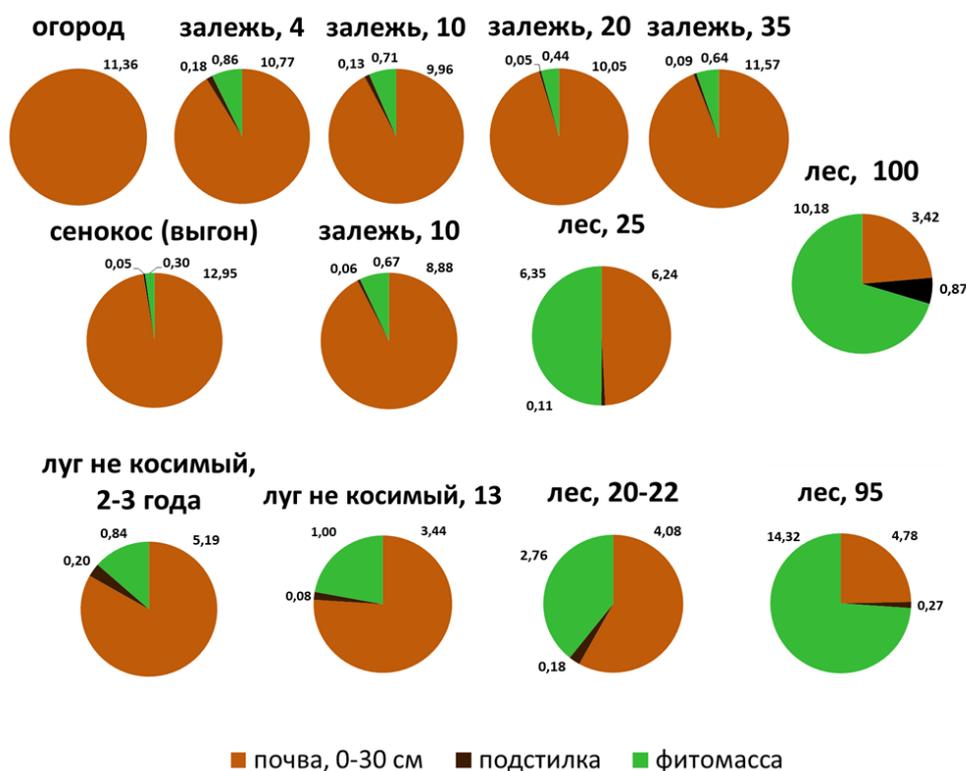


Рисунок 4. Структура запасов углерода ($\text{кг}/\text{м}^2$) в постагрогенных экосистемах южной тайги в ходе естественного восстановления леса на огороде и сенокосах (Мантуровский район).

Полученные результаты позволяют проследить за динамикой функционального и структурных пулов органического вещества почв в ходе зарастания пашни лесом.

К функциональным пулам относится пул микробной биомассы. В динамике запасов углерода микробной биомассы в почвах хроноряда, соответствующего зарастающей пашне на территории Мантуровского района, отмечается максимум на стадии леса 45 лет. В почвах хроноряда на территории Парфеньевского района запасы микробной биомассы тоже увеличиваются на стадии леса 45 лет, но в отличие от первого хроноряда они не снижаются в почвах 80–100 летнего леса (рис. 5).

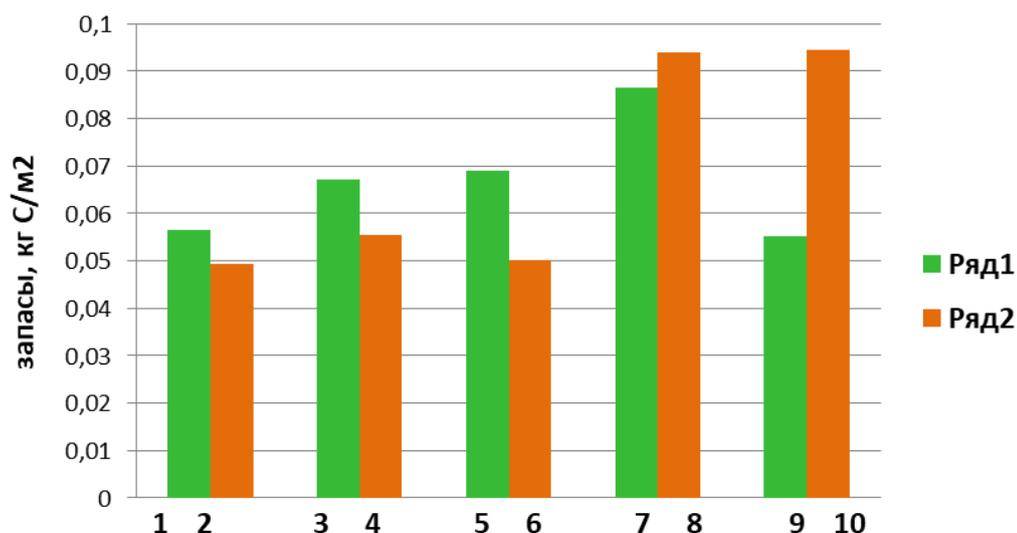


Рисунок 5. Запасы углерода микробной биомассы в 0–30 см слое почвы при зарастании пашни лесом. Условные обозначения: Ряд 1 – Мантуровский район: 1 – пашня, 3 – залежь 8 лет, 5 – залежь 13 лет, 7 – лес вторичный 45 лет, 9 – лес 100 лет. Ряд 2 – Парфеньевский район: 2 – пашня, 4 – залежь 7 лет, 6 – залежь 20 лет, 8 – лес вторичный 45 лет, 10 – лес 100 лет.

Для оценки запасов структурных пулов органического вещества почв хроноряда зарастающей лесом пашни (Парфеньевский район) были использованы результаты гранулоденсиметрического фракционирования органического вещества этих почв (Ерохова и др., 2014). Пул POM, представленный твердыми органическими частицами размером 1–0,053 мм, характеризует свободное органическое вещество, локализованное в межагрегатном поровом пространстве почвы. Пул MAOM представляет защищенное от микробного разложения органическое вещество в результате органо-минеральных взаимодействий. Полученные данные свидетельствуют об увеличении доли свободного органического вещества при переходе от пашни к лесным экосистемам (рис. 6).

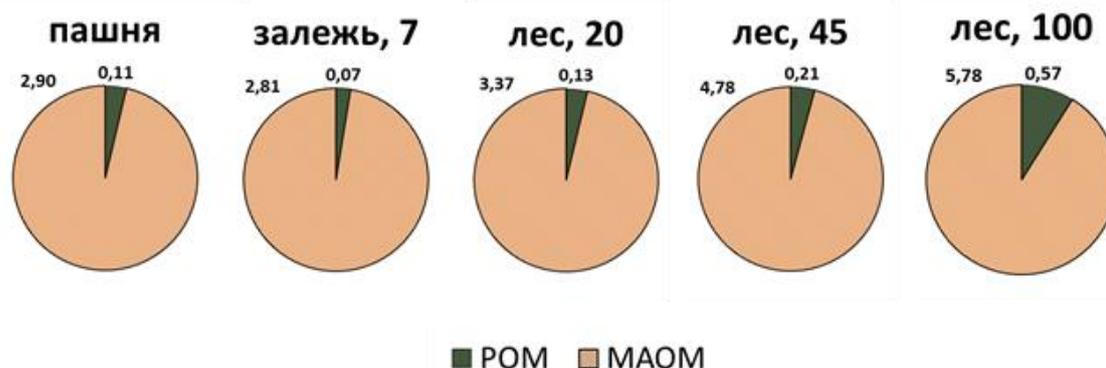


Рисунок 6. Структура запасов углерода (кг/м²) в 0–30 см слое почвы при зарастании пашни лесом. POM – Particulate Organic Matter (свободное органическое вещество). MAOM – Mineral-Associated Organic Matter (защищенное органическое вещество).

ОБСУЖДЕНИЕ

Для обоих хронорядов, представляющих собой зарастающие пашни, получены сходные в целом результаты по динамике пулов углерода, аккумулируемого растительностью. После 20 лет доля углерода фитомассы составляет более 50% от общего пула углерода экосистемы, поскольку восстановление древостоя происходит достаточно быстро – берёза, наличествующая на ранних и средних стадиях сукцессии, характеризуется чрезвычайно быстрым ростом и, как следствие, аккумуляцией углерода (Гульбе, 2006). Пахотные почвы в последнее время практически не подвергались мероприятиям по окультуриванию, в частности внесению органических удобрений, в результате чего, вероятно, и стадия бурного развития сорно-рудерального высокотравья, тормозящая возобновление древостоя, здесь отсутствует. Для хроноряда, развитого на тяжёлых почвах, выявлен более отчётливый тренд роста запасов углерода фитомассы. По-видимому, на относительно богатых почвах возобновляется более продуктивный и разнообразный по видовому составу древостой.

Возобновление древесной растительности по сенокосу и, как следствие, динамика запасов аккумулируемого в её составе углерода, существенно не отличается от возобновления по пашне – здесь различия больше наблюдаются применительно к биомассе и составу травостоя и их динамике, что может быть связано с особенностями гранулометрического состава почв, от которого зависит число ранних стадий сукцессии (Сушков, 1974). В то же время при зарастании выгона-сенокоса, наблюдается несколько иная картина: поскольку в почву по ходу выпаса скота в течение долгого времени поступало органическое вещество с навозом, это способствовало росту высокопродуктивного травостоя. После прекращения сенокосения злаки уступают место другим видам, требовательным к обогащённости почвы азотом, в том числе и высокопродуктивным (борщевик сибирский, бодяк полевой, купырь лесной). Это, в свою очередь, создает не самые благоприятные условия для быстрого восстановления древесной растительности, поскольку высокотравье может затормаживать лесовосстановительную сукцессию (Люри и др., 2010).

Наконец, отсутствие накопления углерода древесной и кустарниковой многолетней растительностью при зарастании частного огорода связано именно с блокировкой сукцессии высокотравными нитрофильными травянистыми растениями (крапива двудомная, лопух большой, дудник лесной, борщевик сибирский), которые доминируют в травостое в течение многих лет по причине сильной обогащённости почвы азотом и зольными элементами. Баланс органического вещества в почве, в свою очередь, в течение долгого времени поддерживается нитрофильным высокотравьем с высокой продуктивностью.

Таким образом, скорость возобновления древостоя в течение постагрогенной сукцессии и, как следствие, секвестирование углерода многолетними частями древостоя, определяется типом сельскохозяйственного использования, а именно внесением дополнительных органических веществ – целенаправленного удобрения навозом или его поступления в процессе выпаса скота.

Полученные данные наглядно иллюстрируют, что при восстановлении естественной растительности во всех изученных рядах со временем происходит увеличение запасов органического вещества в экосистеме и уменьшение доли почвенного углерода, которая в лесных экосистемах 95–100 лет составляет не более 25%. Наибольшие различия в соотношении пулов углерода приходятся на возраст 13–25 лет, когда на почвах с низкими запасами C_{org} уже происходит смыкание крон молодых деревьев, а на почвах с высокими запасами органического вещества и элементов питания (как правило, земли огородов и бывших поселений) эта стадия может ещё и не начинаться. Для Костромской области, где проблема покинутых деревень достаточно актуальна, даже через 40–50 лет можно увидеть среди леса островки высокотравья, выросшего на землях заброшенных поселений; однако площадь таких участков, безусловно, не велика. Доля почвенного углерода в залежах 13–25 лет может меняться от 95% при зарастании огородов до 35% при зарастании пашни. В возрасте 45–50 лет в лесных сообществах, как правило, заканчивается изреживание древесного яруса, и они приобретают стабильную структуру. В почвах лёгкого и тяжёлого гранулометрического состава общие запасы органического углерода близки и составляют 14,46 и 14,38 кг/м², соответственно. Таким образом, можно заключить, что запасы органического вещества при естественном лесовозобновлении на начальных стадиях зависят от степени сельскохозяйственного освоения; к возрасту 45–50 лет эти различия сглаживаются, исключая земли поселений и огородов, а к 95–100 годам имеют устойчивое соотношение пулов углерода.

Общие запасы углерода в экосистеме, включающие углерод почвы, подстилки и биомассы, возрастают в течение постагрогенной сукцессии по пашне и сенокосу в 4–7 раз при условии быстрого возобновления древостоя.

ВЫВОДЫ

1. Скорость возобновления древесной растительности, накапливающей углерод в многолетних частях, зависит от вида использования угодья, а именно от внесения в почву дополнительного органического вещества. Интенсивное удобрение навозом в течение многих лет может задержать возобновление древостоя на несколько десятков лет по причине пролонгирования развития нитрофильного высокотравья.

2. В течение постагрогенной сукцессии по пашням и сенокосам общие запасы углерода в экосистеме увеличиваются в 4–7 раз за счёт возобновления древостоя. Доля почвенного углерода в общем запасе снижается с 70–100 до 25–30% в течение 40–50 лет. В ходе сукцессии по хорошо удобренным частным огородам доля почвенного углерода через 35 лет все ещё составляет более 80% от общего углерода экосистемы.

3. Направление изменения запасов почвенного органического углерода в старопашотной толще детерминирована градиентом данного показателем между начальной и конечной стадиями сукцессии, а также скоростью возобновления лесной растительности. При зарастании пахотных почв с низким содержанием органического вещества запасы углерода в старопашотной толще увеличиваются почти вдвое, тогда как при зарастании высокопродуктивных залежей по огороду, почвы которых обогащены органическим веществом, за 35 лет запасы углерода практически не меняются.

4. Запасы углерода микробной биомассы, а также доля углерода структурного пула POM (Particulate Organic Matter) в составе органического вещества почв увеличиваются по мере восстановления леса по пашне соответственно в 1,8 и 3 раза к стадии субклимаксного леса.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800321-4 «Индикаторы трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов в природных и антропогенных экосистемах»), а также в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

ЛИТЕРАТУРА

Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу. Москва: Издательство Моск. ун-та., 1970. 244 с.

- Артемьева 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.
- Болысов С.И., Фузеина Ю.Н. Физико-географические условия Костромского Заволжья. Геолого-геоморфологическое устройство // Костромское Заволжье: природа и человек. Москва: ИПЭЭ РАН, 2001. С. 36–60.
- Владыченский А.С., Телеснина В.М., Румянцева К.А., Чалая Т.А. Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги (на примере Костромской области) // Почвоведение. 2013. № 5. С. 570–582. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1305016X>
- Гульбе А.Я. Динамика фитомассы и годичной продукции молодняка березы на залежи в южнотаежной подзоне (Ярославская область) // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 4S (54). С. 34–37.
- Ерохова А.А., Моргун Е.Г., Макаров М.И., Рыжова И.Н. Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308–1314. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14110045>
- Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев // Лесоведение. 2005. № 6. С. 73–81.
- Кечайкина И.О., Рюмин А.Г., Чуков С.Н. Постагрогенная трансформация органического вещества дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1178–1192.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Когут Б.М. Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // Почвоведение. 2003. № 3. С. 308–316.
- Курганова И.Н., Семенов В.М., Кудеяров В.Н. Климат и землепользование как ключевые факторы стабильности органического вещества в почвах // Доклады Академии наук. 2019. Том 489. № 6. С. 646–650. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524896646-650>
- Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес де Гереню В.О., Личко В.И., Караванова Е.И. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030102>
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
- Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Фомина А.С. Изменение гумусного состояния дерново-подзолистой песчаной почвы при окультуривании и последующем исключении из хозяйственного оборота // Агрохимия. 2004. № 8. С. 13–19.
- Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. Москва: ГЕОС, 2010. 416 с.
- Мамонтов В.Г., Афанасьева Р.А., Родионова Л.П., Быканова О.М. К вопросу о лабильном органическом веществе почв // Плодородие. 2008. № 2. С. 20–22.
- Моргун Е.Г., Макаров М.И. Использование поливольфрамата натрия при грануло-денсиметрическом фракционировании почвенного материала // Почвоведение. 2011. № 4. С. 433–438.
- Морозов А.М., Николаева И.О. особенности лесообразовательного процесса на пашне и сенокосе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2013. № 5 (103). С. 82–86.
- Овсепян Л.А. Постагрогенная динамика запасов и состава органического вещества серых лесных почв московской области // Материалы по изучению русских почв: сборник. Вып. 9 (36). Санкт-Петербург: СПбГУ, 2017. С. 229–232.
- Овсепян Л.А. Фракционный состав органического вещества и микробная активность постагрогенных серых лесных почв и черноземов. Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Москва, 2018. 24 с.
- Огурева Г.Н. Ботанико-географическое районирование СССР. Москва: Издательство Моск. ун-та, 1991. 76 с.
- Пристова Т.А. Содержание углерода в растениях среднетаежных листовых фитоценозов республики Коми // Принципы экологии. 2022. № 3 (45). С. 43–49. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2022.12402>

- Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1435. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>
- Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в Костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307–317.
- Семенов В.М., Кравченко И.К., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Гисперт М., Пардини Дж. Экспериментальное определение активного органического вещества в некоторых почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2006. № 3. С. 282–292.
- Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Семенов М.В., Курганова И.Н. Пулы и фракции органического углерода в почве: структура, функции и методы определения // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 1. е199. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199>
- Сушков С.Ф. Динамика почвенно-растительного покрова на залежных землях (на примере юго-западных районов Ленинградской области). Автореферат диссертации ... канд. биол. наук. Ленинград, 1974. 22 с.
- Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 115–129. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16010111>
- Телеснина В.М., Жуков М.А. Влияние способа сельскохозяйственного освоения на динамику биологического круговорота и ряда почвенных свойств в ходе постагрогенной сукцессии (Костромская область) // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1114–1129. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1907013X>
- Уткин А.И., Замолдчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в Европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6. С. 36–46.
- Щепаченко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology and Biochemistry. 1978. Vol. 10. No. 3. P. 215–221.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
- Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A., Goryachkin S., Lyuri D., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2013. Vol. 207–208. P. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>
- Kalinina O., Goryachkin S., Karavaeva N., Lyuri D., 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. No. 1–2. P. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014>
- Kalinina O., Goryachkin S., Karavaeva N., Lyuri D., Giani L. Research Dynamics of carbon pools in post-agrogenic sandy soils of southern taiga of Russia // Carbon Balance and Management. 2010. Vol. 5. No. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-5-1>
- Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Postagrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // Catena. 2015. Vol. 129. P. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.016>
- Kalinina O., Krause S.E., Goryachkin S., Karavaeva N., Lyuri D., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2011. Vol. 162. No. 1–2. P. 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.005>
- Kämpf I., Hölzel N., Störrle M., Broll G., Kiehl K. Potential of temperate agricultural soils for carbon sequestration: A meta-analysis of land-use effects // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 566–567. P. 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.067>
- Lavallee J.M., Soong J.L., Cottruflo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // Global Change Biology. 2020. Vol. 26. No. 1. P. 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
- Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., Van Wesemael B., Schumacher J., Gensior A. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach: soil

organic carbon and land-use change // *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. No. 7. P. 2415–2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>

Поступила в редакцию 06.06.2024

Принята 23.08.2024

Опубликована 17.09.2024

Сведения об авторах:

Телеснина Валерия Михайловна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); vtelesnina@mail.ru

Подвезенная Марина Александровна – кандидат биологических наук, научный сотрудник факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); podvezennaya@yandex.ru

Рыжова Ирина Михайловна – доктор биологических наук, профессор факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва, Россия); ryzhova@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Dynamic of carbon pools in the postagrogenic ecosystems of the southern taiga

© 2024 V. M. Telesnina , M. A. Podvezennaya , I. M. Ryzhova 

M. V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gort 1/12, Moscow, Russia. E-mail: vtelesnina@mail.ru

The aim of the study was to assess the nature of changes in the main carbon pools of ecosystems during post-agrogenic vegetation restoration for different agricultural lands.

Location and time of the study. The research was carried out in the Kostroma region. The objects are chronosequences, representing overgrown arable land, hayfield, hayfield-pasture and a well-fertilized private garden.

Methods. The biomass of forest stand was calculated allometrically; the biomass of living ground plant cover was calculated using the method of cuttings (aboveground) and monoliths (underground). Soil organic carbon content was determined by dichromate digestion, and soil microbial biomass was assessed by substrate-induced respiration.

Results. During succession in arable lands and hayfields, an increase in ecosystem carbon reserves was revealed due to the growth of woody phytomass, the share of carbon reserves growing from 0–10 to 65–78% over 40–50 years. When fertilized vegetable gardens become overgrown within 35 years, there was no regeneration of the tree stand. The upper horizons of arable soils contained 0,83–1,05% organic carbon, whereas the soil of the hay and the hay-pasture meadows contained 2,25% and 3,97%, respectively, and the soil of a vegetable garden contained 4,89%. When arable land is overgrown, carbon reserves in the old arable layer increased from 2,0–2,6 to 3,0–5,0 kg C/m²; when the hay meadow is overgrown, soil organic carbon stock decreased from 5,2 to 4,8 kg C/m²; in the hayfield-pasture, it decreased by 3,8 times; in the vegetable gardens, the carbon stock (10 kg C/m²) remained virtually unchanged for 35 years.

Conclusions. When reforesting arable lands, as well as hayfields in the absence of livestock grazing, ecosystem carbon reserves increased 4–7 times with a decrease in the soil carbon share. The direction and nature of the carbon pools dynamics is determined by the soil humus state at the beginning of succession and, as a consequence, the type of use.

Keywords: succession; arable land; haymaking land; soil organic matter; Albic Retisol; Retic Albic Podzol; podzols; soddy-podzolic soils.

How to cite: Telesnina V.M., Podvezennaya M.A., Ryzhova I.M. Dynamic of carbon pools in the postagrogenic ecosystems of the southern taiga. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(3). e272. DOI: [10.31251/pos.v7i3.272](https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.272) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 121040800321-4 “Indicators of transformation of biogeochemical cycles of nutrients in natural and anthropogenic ecosystems”), as well as within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow State University named after M.V. Lomonosov “The future of the planet and global environmental changes”.

REFERENCES

- Arinushkina E.V. Soil Chemical Analysis Guide. Moscow: Moscow State University Press, 1970. 244 p. (in Russian).
- Artemyeva Z.S., Ryzhova I.M., Sileva T.M., Erokhova A.A. Stabilization of organic carbon in microaggregates of soddy-podzolic soils depending on the nature of land use. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie (Lomonosov Soil Science Journal)*. 2013. No. 3. P. 19–26. (in Russian).
- Bolysov S.I., Fuzeina Yu.N. Physico-geographical conditions of the Kostroma Trans-Volga region. Geological and geomorphological structure. In book: *Kostroma Trans-Volga region: nature and people*. Moscow: IPEE RAS Publ., 2001. P. 36–60. (in Russian).
- Vladychenskii A.S., Telesnina V.M., Rummyantseva K.A., Chalaya T.A. Organic matter and biological activity of postagrogenic soils in the southern taiga using the example of Kostroma oblast. *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46. No. 5. P. 518–529. <https://doi.org/10.1134/S1064229313050141>
- Gulbe A.Ya. Dynamics of phytomass and annual production of birch underwood on lode of the southern taiga subband (Yaroslav region). *Vestnik of the Orenburg State University*. 2006. No. 4S (54). P. 34–37. (in Russian).
- Erokhova A.A., Makarov M.I., Morgun E.G., Ryzhova I.N. Effect of the natural reforestation of an arable land on the organic matter composition in soddy-podzolic soils. *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47. No. 11. P. 1100–1106. <https://doi.org/10.1134/S1064229314110040>
- Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. Conversion coefficients phytomass/reserves related to dendrometric parameters and stand composition. *Lesovedenie*. 2005. No. 6. P. 73–81. (in Russian).
- Kechaikina I.O., Ryumin A.G., Chukov S.N. Postagrogenic transformation of organic matter in soddy-podzolic soils. *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. No. 10. P. 1077–1089. <https://doi.org/10.1134/S1064229311100061>
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kogut B.M. Principles and methods of assessing the content of labile organic matter in plowed soils. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No. 3. P. 283–290.
- Kurganova I.N., Semenov V.M., Kudiyarov V.N. Climate and land use as key factors of the stability of organic matter in soils. *Doklady Biological Sciences*. 2019. Vol. 489. No. 1. P. 189–192. <https://doi.org/10.1134/S0012496619060085>
- Kurganova I.N., Lopez de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Telesnina V.M., Karavanova E.I. The dynamics of carbon pools and biological activity of retic albic podzols in southern taiga during the postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 337–351. <https://doi.org/10.1134/S1064229321030108>
- Kurganova I.N., Lopez de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation. *The Journal of Soils and Environment*. 2022. Vol. 5. No. 2. e169. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
- Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Chernov D.V., Fomina A.S. Changes in the humus state of soddy-podzolic sandy soil during cultivation and subsequent exclusion from economic use. *Agrokhimia*. 2004. No. 8. P. 13–19. (in Russian).
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. Dynamics of agricultural lands in Russia in the twentieth century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils. Moscow: GEOS Publ., 2010. 416 p. (in Russian).
- Mamontov V.G., Afanasyeva R.A., Rodionova L.P., Bykanova O.M. On the issue of labile soil organic matter. *Plodorodie*. 2008. No. 2. P. 20–22. (in Russian).
- Morgun E.G., Makarov M.I. Use of sodium polytungstate in the granulo-densimetric fractionation of soil material. *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. No. 4. P. 394–398. <https://doi.org/10.1134/S1064229311040077>
- Morozov A.M., Nikolaeva I.O. Features of the forest formation process in arable land and hayfields. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2013. No. 5(103). P. 82–86. (in Russian).

- Ovsepyan L.A. Postagrogenic dynamics of reserves and composition of organic matter in gray forest soils of the Moscow region. *Materialy po izucheniyu russkikh pochv (Materials on the study of Russian soils): Collection*. Vol. 9(36). St. Petersburg: SPbU, 2017. P. 229–232. (in Russian).
- Ovsepyan L.A. Fractional composition of organic matter and microbial activity of postagrogenic gray forest soils and chernozems. *Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Moscow*. 2018. 24 p. (in Russian).
- Ogureeva G.N. *Botanical-geographical zoning of the USSR*. Moscow: Moscow State University Press, 1991. 76 p. (in Russian).
- Pristova T.A. Carbon content in plants of the middle taiga deciduous forest of the Komi republic. *Principles of the Ecology*. 2022. No. 3 (45). P. 43–49. (in Russian). <https://doi.org/10.15393/j1.art.2022.12402>
- Ryzhova I.M., Erokhova A.A., Podvezennaya M.A. Dynamics and structure of carbon storage in the postagrogenic ecosystems of the southern taiga. *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47. No. 12. P. 1207–1215. <https://doi.org/10.1134/S1064229314090117>
- Ryzhova I.M., Erokhova A.A., Podvezennaya M.A. Alterations of the carbon storages in postagrogenic ecosystems due to natural reforestation in Kostroma oblast. *Lesovedenie*. 2015. No. 4. P. 307–317. (in Russian).
- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Kravchenko I.K., Gispert M., Pardini J. Experimental determination of the active organic matter content in some soils of natural and agricultural ecosystems. *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 39. No. 3. P. 251–260. <https://doi.org/10.1134/S1064229306030033>
- Semenov V.M., Lebedeva T.N., Lopez de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Semenov M.V., Kurganova I.N. Pools and fractions of organic carbon in soil: structure, functions and methods of determination. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 1. e199. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i1.199>
- Sushkov S.F. Dynamics of soil and vegetation cover on fallow lands (using the example of the southwestern regions of the Leningrad region). *Abstract of Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Leningrad*, 1974. 22 p. (in Russian).
- Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlson A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma oblast. *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol. 49. No. 1. P. 102–115. <https://doi.org/10.1134/S1064229316010117>
- Telesnina V.M., Zhukov M.A. The influence of agricultural land use on the dynamics of biological cycling and soil properties in the course of postagrogenic succession (Kostroma oblast). *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1122–1136. <https://doi.org/10.1134/S1064229319070135>
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gulbe T.A., Gulbe Ya.I. Allometric equations for phytomass based on the data on pine, spruce, birch and aspen trees in European Russia. *Lesovedenie*. 1996. No. 6. P. 36–46. (in Russian).
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46. No. 2. P. 107–116. <https://doi.org/10.1134/S1064229313020129>
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. Vol. 10. No. 3. P. 215–221.
- IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Report No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
- Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A., Goryachkin S., Lyuri D., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools. *Geoderma*. 2013. Vol. 207–208. P. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.019>
- Kalinina O., Goryachkin S., Karavaeva N., Lyuri D., 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. No. 1–2. P. 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014>
- Kalinina O., Goryachkin S., Karavaeva N., Lyuri D., Giani L. Research Dynamics of carbon pools in post-agrogenic sandy soils of southern taiga of Russia. *Carbon Balance and Management*. 2010. Vol. 5. No. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-5-1>
- Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Postagrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia. *Catena*. 2015. Vol. 129. P. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.016>
- Kalinina O., Krause S.E., Goryachkin S., Karavaeva N., Lyuri D., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools Self-restoration of post-

agroenic chernozems of Russia: Soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools. *Geoderma*. 2011. Vol. 162. No. 1–2. P. 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.005>

Kämpf I., Hölzel N., Störrle M., Broll G., Kiehl K. Potential of temperate agricultural soils for carbon sequestration: A meta-analysis of land-use effects. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 566–567. P. 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.067>

Lavallee J.M., Soong J.L., Cottrifo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26. No. 1. P. 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>

Poepflau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., Van Wesemael B., Schumacher J., Gensior A. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach: soil organic carbon and land-use change. *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. No. 7. P. 2415–2427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>

Received 06 June 2024

Accepted 23 August 2024

Published 17 September 2024

About the authors:

Valeria M. Telesnina – Candidate of Biological Sciences, Senior Research Assistant of the Soil Science Faculty of the M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); vtelesnina@mail.ru

Marina A. Podvezennaya – Candidate of Biological Sciences, Research Assistant of the Soil Science Faculty of the M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); podvezennaya@yandex.ru

Irina M. Ryzhova – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Soil Science Faculty of the M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); iryzhova@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)