

ДЕГРАДАЦИЯ,  
ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.41

ДИНАМИКА СВОЙСТВ ПОЧВ И СТРУКТУРЫ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА  
В ПОСТАГРОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ  
В ПРОЦЕССЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ

© 2020 г. И. М. Рыжова<sup>а</sup>, В. М. Телеснина<sup>а, \*</sup>, А. А. Ситникова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: vtelesnina@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2019 г.

После доработки 25.06.2019 г.

Принята к публикации 20.09.2019 г.

Изучена динамика ряда свойств почв, а также запасов углерода в основных компонентах постагрогенных экосистем в ходе естественного лесовосстановления в зависимости от литологических условий и характера сельскохозяйственного использования в прошлом на примере четырех хронорядов на территории Костромской области. По мере лесовосстановления происходит увеличение кислотности и уменьшение содержания обменных оснований в верхней части профиля, более четкий тренд выявлен для легких почв. Характер динамики содержания и запасов органического углерода определяется типом использования угодья, а интенсивность постагрогенной динамики — нативными свойствами почвы. По мере восстановления лесной растительности происходит постепенная дифференциация старопахотной толщи по содержанию и запасам углерода, максимально выраженная в почвах лесов 90–100 лет. Примерно за 100 лет общий запас органического углерода в экосистеме возрастает в 7–9 раз при зарастании пахотных угодий, в 3.5 раза — при зарастании сенокосов. Изменяется структура запасов углерода в экосистеме — доля почвенного углерода через 20 лет после прекращения использования уменьшается с 80 до 50%, доля детрита, напротив, возрастает до 10% от общего запаса.

*Ключевые слова:* залежи, постагрогенные почвы, сукцессия, Albic Podzol, Albic Retisol

**DOI:** 10.31857/S0032180X20020100

## ВВЕДЕНИЕ

Характер землепользования является одним из наиболее значимых антропогенных факторов, влияющих на условия почвообразования, биологический круговорот, а, следовательно, и на свойства почв, их гидротермический, газовый и питательный режимы. В результате экономического кризиса 1990-х гг. в России произошло масштабное сокращение сельскохозяйственных земель. В период 1990–2007 гг. было выведено из сельскохозяйственного оборота около 50 млн га [14]. В настоящее время наблюдается возврат залежей в сельскохозяйственное использование в лесостепных и степных регионах, тогда как в лесной зоне, на долю которой приходится 2/3 залежных земель России, на большей части этих площадей происходит естественное лесовосстановление [21].

Характер растительности оказывает весьма существенное влияние на целый ряд химических почвенных свойств и их биологической активности [11, 16, 20]. При зарастании бывших агрогенных почв в наибольшей степени изменяются свойства их верхней старопахотной толщи [23, 38]. Агро-

генно-измененные свойства почв по устойчивости во времени, проявляющейся при восстановлении естественной растительности, разделяют на три группы: наиболее устойчивые (около 200 лет и более), менее устойчивые (от нескольких лет до первых десятков лет) и динамические. В процессе зарастания бывшей пашни быстрее всего восстанавливаются такие свойства, как кислотность и содержание обменных оснований [4, 40]. В связи с проблемой глобального изменения климата особую актуальность приобрела оценка секвестрации углерода в результате восстановления зональных природных экосистем на залежных землях. Общее накопление углерода постагрогенными экосистемами всей территории России в первые 20 лет после выведения из сельскохозяйственного использования в среднем составляет  $155 \pm 27$  млн т С в год [45]. При этом средняя скорость аккумуляции углерода в бывших пахотных почвах России в этот период оценивается в  $105 \pm 10$  г С/м<sup>2</sup> в год [44]. Скорость секвестрации углерода постагрогенными экосистемами зависит от возраста залежи, природной зоны и множества

других факторов [13, 19, 33, 43]. По опубликованным данным в процессе естественного лесовосстановления увеличивается общий запас углерода в экосистеме [36]. Это происходит за счет многократного роста запасов фитомассы и формирования горизонта подстилки. Направленность и величина изменений запаса углерода в минеральной толще почв может быть разной в зависимости от совокупности факторов, таких как история предыдущего использования почвы, ее тип, свойства, биоклиматические условия. Поэтому большое внимание уделяется изучению динамики содержания, запасов и состава органического вещества почв в ходе естественного зарастания залежей в разных природных зонах [2, 6–9, 18, 27, 29, 31, 40, 41]. Результаты вычислительных экспериментов на основе динамических моделей круговорота углерода демонстрируют, что при любых запасах углерода на пашне при ее зарастании лесом значение запасов стремится к стационарному состоянию, которое определяется биоклиматическими, литологическими и геоморфологическими условиями. При выводе из сельскохозяйственного оборота бедных малогумусных почв запасы органического углерода в них увеличиваются, в богатых почвах они уменьшаются, а в почвах с запасами, близкими к стационарной величине, практически не изменяются [30, 42]. Общую картину усложняют факторы, блокирующие естественное лесовосстановление, в результате чего замедляется достижение зональных величин запасов углерода в почве. К таким факторам, в частности, относится появление растений из группы рудерального высотравья, являющиеся блокираторами сукцессии, например, борщевика Сосновского [21].

Цель работы – изучение динамики свойств почв и запасов углерода в основных компонентах постагрогенных экосистем в ходе естественного лесовосстановления в зависимости от литологических условий и характера сельскохозяйственного использования в прошлом на примере четырех хронорядов в европейской южной тайге (Костромская область).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования выбраны постагрогенные экосистемы южной тайги. Они представляют особый интерес, так как занимают более 20% площади этой зоны [22]. Работу проводили на территории двух районов Костромской области: Парфеньевского и Мантуровского. Условия почвообразования характерны для южной тайги, где естественные растительные сообщества представлены еловыми травяно-кустарничковыми лесами [26]. Территория относится к северо-восточной подобласти атлантико-континентальной лесной области. Среднегодовая температура воздуха составляет 2.1°C, среднегодовое количество осад-

ков – 564 мм. Почвообразующие породы представляют разнообразные ледниковые и водноледниковые отложения [3].

### *Парфеньевский район*

Все пробные площади расположены на расстоянии 100–250 м друг от друга на выровненном водоразделе р. Соег (приток р. Вохтомы, р. Вохтома – приток р. Неи). Почвообразующими породами на изучаемой территории являются покровные суглинки, подстилаемые мореной. В качестве объектов исследования послужили хроноряды постагрогенных экосистем (табл. 1). Первый хроноряд (ПП – Парфеньевский район, пахотные угодья) включает следующие стадии: 1 – пашню (посев овса), 2 – разнотравно-злаковый луг (залежь 7–11 лет), 3 – молодой лес с густым травяным покровом (залежь 20–24 лет), 4 – лес 45–50 лет и 5 – вторичный ельник (80–100 лет). Рассматриваемые экосистемы сформированы на агродерново-подзолистых и постагрогенных дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах. Названия почв даны в соответствии с классификацией почв России [15].

Второй хроноряд (ПС – Парфеньевский район, сенокосные угодья) включает: сенокосное угодье, молодой лес 17 лет, лес 50 лет и еловый лес 140–150 лет.

### *Мантуровский район*

Первый хроноряд (МП – Мантуровский район, пахотные угодья) расположен в 1–2 км от русла р. Унжи. Почвообразующие породы – пески, подстилаемые на разной глубине тяжелыми глинами. Этот хроноряд представляет собой зарастающую пашню со следующими стадиями: 1 – пашня, 2 – залежь 7–10 лет, 3 – залежь 12–15 лет, на которой почти сформирован древостой, 4 – мелколистный вторичный лес 40 лет, 5 – березово-еловый лес 100 лет. Выбранные площадки расположены недалеко друг от друга и соответствуют одному элементу мезорельефа. Различия в профиле распределения соотношения песчаных, пылеватых и илистых фракций обусловлены общей пестротой почвообразующих пород, при этом варьирование гранулометрического состава, как в пределах одной мониторинговой площадки, так и между площадками, не было существенным [32]. В профилях почв, соответствующих разным стадиям сукцессии, супесчаные отложения подстилаются тяжелыми и средними суглинками на глубинах соответственно: МП0 – 70–72 см (в разные годы описания от 2004 до 2011), МП7–11 – от 75 до 100 см, КП12–15 – 65–75 см, МП40 – 64–70 см, МП100 – 60–80 см. Особенности данных почв создали определенные проблемы при их наименовании. Согласно классификации почв 2004 г., принадлежность почвы к подзолистой

Таблица 1. Стадии сукцессии в изучаемых хронорядях

| Стадия сукцессии           | Обозначение | Растительность   | Почва   |
|----------------------------|-------------|--|---|
| <i>Парфеньевский район</i> |             |  |   |
| Зарастающая пашня          |             |  |   |
| Пашня                      | ПП0         | Посевы овса ( <i>Avena sativa</i> )  | Агродерново-подзолистая глееватая (P–BELg–BTg–BTCg)                   |
| Залежь 7–11 лет            | ПП7         | Луг с преобладанием мятлика лугового ( <i>Poa pratense</i> ) и ромашника непахучего ( <i>Tripleurospermum inodorum</i> ), с редким подростом сосны ( <i>Pinus sylvestris</i> )   | Агродерново-подзолистая реградированная глееватая (Pw–BELg–BTg–BTCg)  |
| Залежь 20–24 лет           | ПП20        | Подрост сосны ( <i>Pinus sylvestris</i> ), березы ( <i>Betula pendula</i> ) и ивы козьей ( <i>Salix caprea</i> ), в травостое преобладают мятлик луговой ( <i>Poa pratense</i> ) и зверобой продырявленный ( <i>Hypericum perforatum</i> ) | Дерново-подзолистая реградированная глееватая (Pw–AELg–BELg–BTg)      |
| Лес 40–50 лет              | ПП40        | Елово-сосновый ( <i>Picea abies–Pinus sylvestris</i> ) лес с преобладанием в напочвенном покрове иванчая узколистного ( <i>Chamaenerion angustifolium</i> ) и земляники лесной ( <i>Fragaria vesca</i> )                                   | Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая (AYpa–AELg–BELg–BTg)     |
| Лес 80–100 лет             | ПП100       | Сосново-еловый ( <i>Pinus sylvestris–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 (AYpa–ELg–BELg–BTg–BTCg) |
| Зарастающий сенокос        |             |  |   |
| Сенокос                    | ПС0         | Луг  | Агродерново-подзолистая глееватая реградированная (AYpa–BELg–BTg)     |
| Лес 17 лет                 | ПС17        | Молодой лес из сосны ( <i>Pinus sylvestris</i> ), березы ( <i>Betula pendula</i> ) и ивы козьей ( <i>Salix caprea</i> )  | Агродерново-подзолистая глееватая реградированная (AYpa–BEL–BTg)      |
| Лес 50 лет                 | ПС50        | Березово-еловый лес ( <i>Betula pendula–Picea abies</i> )  | Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая (AYpa–EL–BELg–BTg)       |
| Лес 140–150 лет            | ПС150       | Еловый лес ( <i>Picea abies</i> ), в напочвенном покрове черника ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )  | Дерново-подзолистая постагрогенная глееватая (AYpa–EL–BELg–BTg)       |
| <i>Мантуровский район</i>  |             |  |   |
| Зарастающая пашня          |             |  |   |
| Пашня                      | МП0         | Посевы овса ( <i>Avena sativa</i> )  | Агродерново-подзол (P–AE–BE–B–BC)                                     |
| Залежь 7–10 лет            | МП7–10      | Луг с преобладанием овсяницы красной ( <i>Festuca rubra</i> ), ежи сборной ( <i>Dactylis glomerata</i> ) и ястребинки зонтичной ( <i>Hieracium umbellatum</i> )  | Агродерново-подзол реградированный (AYpa–AE–BE–B)                     |
| Залежь 12–15 лет           | МП12–15     | Молодой древостой из ивы козьей ( <i>Salix caprea</i> ) с преобладанием в травостое овсяницы красной ( <i>Festuca rubra</i> ), ситника нитевидного ( <i>Juncus filiformis</i> ) и грушанки круглолистной ( <i>Pyrola rotundifolia</i> )    | Агродерново-подзол реградированный (AYpa–AE–BEg–Bg)                   |

Таблица 1. Окончание

| Стадия сукцессии | Обозначение | Растительность  | Почва  |
|------------------|-------------|---|--|
| Лес 40 лет       | МП40        | Осиново-березовый ( <i>Populus tremula</i> – <i>Betula pendula</i> ) лес, в напочвенном покрове черника ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )  | Дерново-подзол постагрогенный (О–АУра–АЕ–ВЕ–В)           |
| Лес 100 лет      | МП100       | Лес березово-еловый ( <i>Betula pendula</i> – <i>Picea abies</i> ) мохово-черничный<br>Зарастающий сенокос  | Подзол (О–АН–АЕ–Е–ВЕ–В)                                  |
| Залежь 2 года    | МС2         | Луг с преобладанием зверобоя продырявленного ( <i>Hypericum perforatum</i> ) и иван-чая ( <i>Chamaenerion angustifolium</i> )   | Агродерново-подзолистая реградированная (АУра–ЕL–ВЕL–ВТ) |
| Залежь 12 лет    | МС12        | Смешанный древостой с преобладанием березы ( <i>Betula pendula</i> ), в травяном ярусе доминируют ястребинка зонтичная ( <i>Hieracium umbellatum</i> ) и манжетка обыкновенная ( <i>Alchemilla</i> sp.) | Агродерново-подзолистая реградированная (АУра–ЕL–ВЕL–ВТ) |
| Лес 20 лет       | МС20        | 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 (АУра–ЕL–ВЕL–ВТ)      |
| Лес 95 лет       | МС95        | Березово-еловый ( <i>Betula pendula</i> – <i>Picea abies</i> ) лес, в напочвенном покрове грушанка круглолистная ( <i>Pyrola rotundifolia</i> ) и костяника ( <i>Rubus saxatilis</i> )                  | Дерново-подзолистая (АУра–ЕL–ВЕL–ВТ)                     |

или дерново-подзолистой подразумевает наличие текстурного горизонта ВТ. Подзолы, согласно классификации, должны содержать в профиле охристый иллювиально-железистый горизонт ВF, а также подзолистый осветленный горизонт. Изученные почвы в равной степени имеют признаки как подзолистых (дерново-подзолистых) почв, так и литобарьерных подзолов (дерново-подзолов). В большей степени они относятся к агродерново-подзолам литобарьерным, нежели к агродерново-подзолистым, название им дали соответствующее.

Второй хроноряд (МС – Мантуровский район, сенокосные угодья) расположен в 7 км от русла р. Унжи и представляет собой зарастающий сенокосный луг. Почвообразующие породы – опесчаненные покровные суглинки, подстилаемые среднетяжелыми моренными суглинками на глубине 30–35 см. Эта территория в 70–80-х гг. 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 12 лет, 3 – мелколистный вторичный лес 20 лет, 4 – лес 95 лет. Возраст залежей определялся на основе информации, полученной от местных жителей и специалистов, и по результатам анализа древесных кернов.

В каждой из изучаемых экосистем была заложена пробная площадь размером 20 × 20 м, проведено геоботаническое описание. В трех хронорядах (ПП, МП и МС) методом укосов изучена надземная биомасса травяного (травяно-кустарничкового) яруса, методом монолитов – его подземная биомасса. Масса разных фракций древостоя определена аллометрически [10]. Во всех хронорядах на каждой пробной площадке заложен один полный почвенный разрез для отбора образцов по горизонтам, а также 5–6 прикопок для послыоного отбора с глубин 0–10, 10–20, 20–30 см. В почвах определены плотность, актуальная и потенциальная кислотность, гидролитическая кислотность, сумма обменных оснований, содержание и запасы органического углерода. Углерод микробной биомассы определяли методом субстрат индуцированного дыхания [1].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Динамика физических и химических свойств почв

**Плотность почв** является одним из диагностических критериев старопашотного горизонта почв залежей – он отличается от нижележащих горизонтов более низкими величинами плотности, обусловленными концентрацией значительного количества живых и мертвых корней и органического вещества почвы. Плотность старопашотно-

го горизонта неоднородна – наименьшие величины отмечаются в верхней трети (0–10 см), а наибольшие – в нижней (20–30 см). По мере постагрогенного восстановления естественной растительности изменяется плотность сложения в старопахотной толще за счет обособления дернового горизонта, что особенно заметно на примере ряда МП. Так, в почве действующей пашни в пределах толщи 0–20 см значения плотности одинаковы, тогда как уже на следующей стадии наблюдаются различия – в верхней части старопахотного горизонта, где формируется дернина, плотность меньше, нежели в более глубоких подгоризонтах. На стадии мелколиственного леса 40 лет плотность верхней части старопахотного горизонта существенно уменьшается (табл. 2), что связано с формированием более грубогумусного органопрофиля по сравнению с луговыми стадиями сукцессии. То же наблюдается и применительно к почвам зарастающей пашни на суглинистых породах, однако дифференциация в пределах старопахотной толщи наступает позже. Подобные закономерности были отмечены ранее другими авторами [34]. При зарастании сенокосных угодий динамика плотности сложения в верхней части профиля не столь отчетлива, поскольку хорошо выраженный дерновый подгоризонт уже существовал под сенокосом.

**Кислотность почв.** В ходе естественного постагрогенного лесовосстановления на территории тайги в результате изменения состава опада, а также постепенного формирования горизонта лесной подстилки, происходит постепенное подкисление почвы, по крайней мере ее верхних горизонтов, соответствующих старопахотной толще [19]. Однако подкисление почвы в ходе постагрогенной сукцессии происходит с неодинаковым трендом при разном гранулометрическом составе и характере использования почвы в прошлом [24], что и подтвердилось результатами наших исследований. Наиболее четкий тренд постагрогенного повышения как актуальной, так и потенциальной кислотности выявлен для зарастающей пашни, почвы которой образованы на песках, подстилаемых суглинком (ряд МП). Так, величина рН существенно уменьшается с 5.4 до 4.6 уже при появлении древостоя, а после выхода в древостой хвойных пород – до 3.6. В то же время при зарастании пашни, почвы которой образованы на суглинках (ПП), кислотность сколь-либо существенно увеличивается лишь на стадии 100-летнего леса. Другими авторами при изучении постагрогенной эволюции почв разного гранулометрического состава установлено, что подкисление тяжелых почв происходит гораздо медленнее, нежели более легких [19]. Возможно, здесь играет роль не только гранулометрический состав почвы, но и степень ее окультуренности – при низкой окультуренности и легком гранулометрическом составе восстановле-

ние исходных свойств происходит быстрее. Показательно, что в вышеописанных двух хронорядов почвы контроля, т.е. 100-летнего леса имеют разную кислотность, причем почва МП100 намного кислее ПП100, т.е. разница между начальной и конечной стадиями сукцессии существеннее. Что касается зарастающих сенокосов, тенденция к постагрогенному подкислению выражена не так отчетливо, как при зарастании пашни, по видимому, по причине более сложной истории освоения – почти всегда сенокосы образованы на месте пашни, но стадия рудерального высокотравья, соответствующая кратковременной интенсификации биологического круговорота, уже прошла и наиболее лабильные свойства почвы стабилизированы. Особый интерес представляет ряд МС, поскольку луг, соответствующий первой стадии сукцессии, уже несколько лет не косится. Поскольку мониторинг здесь ведется с 2005 г., а несколько лет назад прекращено выкашивание, появилась возможность наблюдать динамику растительности и некоторых свойств почв сразу после прекращения кошения [33]. При изучении свойств почвы в 2005 г. установлено постепенное увеличение кислотности от стадии сенокоса к стадии 95-летнего леса [5]. В 2015–2016 гг. выявлена другая картина – почва луга МС2 отличается от остальных большей кислотностью старопахотной толщи, причем  $pH_{KCl}$  в слое 0–10 см меньше, чем в слое 10–20 см. С одной стороны, количество наземной фитомассы травостоя уменьшилось за эти годы примерно на 100–150 г/м<sup>2</sup>, с другой, после прекращения выкашивания усилилось накопление растительного опада, что могло вызвать подкисление в верхней части профиля. Динамика гидролитической кислотности в верхней части профиля в целом соответствует динамике актуальной и потенциальной кислотности – по мере сукцессии происходит увеличение этого показателя, однако при зарастании сенокоса в Мантуровском районе динамика практически не выражена.

**Сумма обменных оснований** связана как с содержанием органического вещества, так и с поступлением надземного и подземного растительного опада, богатого кальцием [8]. При постепенном уменьшении продуктивности травостоя, а также увеличении доли хвойных в древесном опаде сумма обменных оснований в верхних горизонтах постепенно уменьшается. При зарастании как пашни, так и сенокосов в изучаемых хронорядов наблюдается, действительно, существенное уменьшение суммы обменных оснований в почве при переходе луговых сообществ в лесные, однако на примере ряда ПП видно, что при достижении вторичным мелколиственным лесом 40 лет сумма обменных оснований снова увеличивается (с 4.8 до 7.6 смоль(экв)/кг), что может быть связано с максимальной интенсивностью поступления

Таблица 2. Физические и химические свойства почв

| Стадия сукцессии                         | Горизонт, глубина см | рН               |      | Нг      | Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup><br>смоль(экв)/кг | S, % | Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> | C <sub>орг</sub> , % |
|--|----------------------|------------------|------|---------|--|------|---------------------------------------|----------------------|
|  |                      | H <sub>2</sub> O | KCl  |         |  |      |                                       |                      |
| Зарастающая пашня, Парфеньевский район   |                      |                  |      |         |  |      |                                       |                      |
| ПП0                                      | P, 0–24              | 4.8              | 3.7  | 4.59    | 8.61   | 65.2 | 1.03                                  | 0.69                 |
|  | BEL, 24–34           | 4.5              | 3.5  | 3.28    | 3.81   | 53.7 | 1.43                                  | 0.40                 |
|  | BT1, 34–65           | 5.0              | 3.9  | 2.41    | 15.4   | 86.5 | 1.42                                  | 0.30                 |
| ПП7                                      | Pw, 0–13             | 4.9              | 4.0  | 4.60    | 7.14   | 61.0 | 1.21                                  | 0.87                 |
|  | Pw, 13–26            | 4.6              | 3.9  | 4.60    | 5.63   | 54.0 | 1.23                                  | 0.80                 |
|  | BEL, 26–49           | 4.3              | 3.4  | 4.39    | 5.30   | 54.6 | 1.25                                  | 0.36                 |
| ПП20                                     | Pw, 2–13             | 4.7              | 3.8  | 6.27    | 4.81   | 43.4 | 1.11                                  | 1.26                 |
|  | Pw, 13–25            | 4.7              | 3.9  | 5.85    | 3.92   | 39.7 | 1.24                                  | 0.84                 |
|  | AEL, 25–44           | 4.7              | 4.0  | 2.19    | 2.04   | 47.6 | 1.04                                  | 0.70                 |
| ПП40                                     | AУра, 4–10           | 4.5              | 3.7  | 9.19    | 7.61   | 45.2 | 0.87                                  | 2.52                 |
|  | AУра, 10–16          | 4.6              | 3.7  | 7.94    | 4.96   | 37.9 | 1.05                                  | 1.52                 |
|  | AEL, 16–30           | 4.5              | 3.6  | 5.01    | 4.37   | 46.6 | 1.36                                  | 0.31                 |
| ПП100                                    | AУра, 4–12           | 4.3              | 3.6  | 8.36    | 6.96   | 45.1 | 1.08                                  | 1.33                 |
|  | AУра, 12–19          | 4.5              | 3.7  | 7.52    | 6.01   | 44.4 | 1.09                                  | 0.70                 |
|  | EL, 19–35            | 4.3              | 3.6  | 3.06    | 2.76   | 48.3 | 1.28                                  | 0.26                 |
| Зарастающий сенокос, Парфеньевский район |                      |                  |      |         |  |      |                                       |                      |
| ПС0                                      | Ad, 0–5              | 5.09             | 4.00 | 4.0     | 23   | 85.2 | 0.83                                  | 1.79                 |
|  | AУраg, 5–20          | 5.53             | 4.27 | 4.1     | 25   | 86.0 | 1.30                                  | 1.00                 |
|  | AУраg, 20–34         | 5.25             | 3.89 | 4.3     | 10   | 69.8 | 1.23                                  | 0.89                 |
|  | BELg, 34–46          | 4.99             | 3.51 | 7.1     | 37   | 83.9 | 1.43                                  | 0.39                 |
| ПС17                                     | Ad, 0–10             | 4.81             | 3.95 | 5.1     | 25   | 83.0 | 0.74                                  | 1.83                 |
|  | AУраg, 10–24         | 5.10             | 4.22 | 3.2     | 20   | 86.2 | 1.40                                  | 0.97                 |
|  | AУраg, 24–38         | 5.17             | 4.28 | 3.3     | 20   | 85.7 | 1.35                                  | 0.81                 |
|  | BEL, 38–58           | 5.07             | 3.64 | 6.6     | 36   | 84.5 | 1.34                                  | 0.27                 |
| ПС50                                     | AУра, 0–10           | 4.79             | 3.90 | 8.9     | 15   | 62.7 | 0.97                                  | 1.50                 |
|  | AУра, 10–21          | 4.74             | 3.50 | 4.6     | 13   | 73.9 | 1.37                                  | 1.30                 |
|  | EL, 21–25            | 4.89             | 3.52 | 6.9     | 13   | 76.9 | 1.35                                  | 0.32                 |
|  | BELg, 25–36          | 4.78             | 3.39 | 8.0     | 46   | 85.1 | 1.34                                  | 0.35                 |
| ПС150                                    | AУра, 0–16           | 5.10             | 3.80 | 11.2    | 23   | 67.3 | 1.11                                  | 1.44                 |
|  | AУра, 16–25          | 5.01             | 3.55 | 6.9     | 10   | 59.1 | 1.22                                  | 1.30                 |
|  | EL, 25–36            | 4.90             | 3.68 | 5.7     | 12   | 67.8 | 1.45                                  | 0.24                 |
|  | BELg, 36–53          | 4.91             | 3.45 | 7.4     | 35   | 82.5 | 1.47                                  | 0.38                 |
| Зарастающая пашня, Мантуровский район    |                      |                  |      |         |  |      |                                       |                      |
| МП0                                      | P, 0–10              | 5.42             | 4.35 | Не опр. |  |      | 1.06                                  | 1.05                 |
|  | P, 10–20             | 5.60             | 4.48 | »       |  |      | 1.06                                  | 1.03                 |
|  | P, 20–30             | Не опр.          |      | »       |  |      | 1.28                                  | 0.21                 |
| МП7                                      | AУра, 0–10           | 5.38             | 4.42 | »       |  |      | 1.13                                  | 1.55                 |
|  | AУра, 10–20          | 5.40             | 4.55 | »       |  |      | 1.25                                  | 0.96                 |
|  | AУра, 20–30          | Не опр.          |      | »       |  |      | 1.25                                  | 0.20                 |
| МП12                                     | AУра, 0–10           | 4.64             | 3.40 | »       |  |      | 1.15                                  | 1.88                 |
|  | AУра, 10–20          | 4.78             | 3.54 | »       |  |      | 1.27                                  | 1.39                 |
|  | AУра, 20–30          | Не опр.          |      | »       |  |      | 1.26                                  | 0.24                 |

Таблица 2. Окончание

| Стадия сукцессии                        | Горизонт, глубина см | рН               |      | Нг   | Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> | S, % | Плотность сложения, г/см <sup>3</sup> | C <sub>орг</sub> , % |
|---|----------------------|------------------|------|------|-------------------------------------|------|---------------------------------------|----------------------|
|   |                      | H <sub>2</sub> O | KCl  |      |                                     |      |                                       |                      |
| МП40                                    | АУра, 0–11           | 4.34             | 3.37 |      | »                                   |      | 0.89                                  | 2.48                 |
|   | АУра, 11–25          | 4.38             | 3.37 |      | »                                   |      | 1.06                                  | 1.91                 |
|   | АЕ, 25–30            | 4.30             | 3.50 |      | »                                   |      | 1.03                                  | 0.41                 |
| МП100                                   | АН, 0–10             | 3.64             | 2.52 |      | »                                   |      | 0.97                                  | 4.05                 |
|   | АЕ, 10–15            | 3.78             | 2.92 |      | »                                   |      | 1.05                                  | 0.60                 |
|   | Е, 15–20             | 4.20             | 3.40 |      | »                                   |      | 1.15                                  | 0.31                 |
|   | ЕВ, 20–30            | 4.45             | 3.60 |      | »                                   |      | 1.22                                  | 0.30                 |
| Зарастающий сенокос, Мантуровский район |                      |                  |      |      |                                     |      |                                       |                      |
| МС2                                     | АУра, 0–10           | 4.60             | 3.37 | 3.64 | 3.22                                | 46.9 | 1.05                                  | 2.25                 |
|   | АУра, 10–20          | 4.85             | 3.59 | 3.29 | 3.48                                | 51.4 | 1.33                                  | 1.33                 |
|   | ЕL, 20–30            | 5.70             | 4.50 | 3.23 | 1.29                                | 28.5 | 1.30                                  | 0.76                 |
| МС12                                    | АУра, 0–10           | 5.40             | 3.60 | 3.14 | 2.20                                | 41.2 | 1.10                                  | 1.00                 |
|   | АУра, 10–20          | 5.47             | 3.77 | 2.90 | 1.98                                | 40.6 | 1.35                                  | 1.05                 |
|   | ЕL, 20–30            | 5,50             | 4.00 | 2.88 | 2.67                                | 48.1 | 1.33                                  | 0.70                 |
| МС20                                    | АУра, 0–10           | 5.15             | 3.70 | 2.78 | 1.89                                | 40.5 | 1.13                                  | 1.63                 |
|   | АУра, 10–20          | 5.26             | 3.64 | 2.53 | 2.31                                | 49.7 | 1.37                                  | 1.08                 |
|   | ЕL, 20–30            | 5,60             | 4.10 | 2.44 | 2.06                                | 45.8 | 1.45                                  | 1.00                 |
| МС95                                    | АУра, 0–10           | 4.98             | 3.51 | 3.10 | 2.58                                | 45.4 | 1.05                                  | 2.21                 |
|   | АУра, 10–20          | 5.16             | 3.57 | 2.88 | 3.16                                | 52.3 | 1.34                                  | 1.08                 |
|   | АУра, 20–27          | 5.40             | 4.00 | 2.72 | 3.58                                | 57.1 | 1.38                                  | 0.96                 |
|   | ЕL, 27–38            | 5.90             | 4.50 | 4.80 | 3.83                                | 44.0 | 1.31                                  | 0.21                 |

Примечание. Нг – гидролитическая кислотность, S – степень насыщенности основаниями.

листового опада в частности и повышенной интенсивностью биологического круговорота, которая наблюдается в мелколиственных насаждениях 35–40 лет [28]. Таким образом, при зарастании заброшенных пашен и сенокосов естественной растительностью динамика почвенных свойств в целом направлена на подкисление и уменьшение содержания обменных оснований, причем наиболее существенные изменения соответствуют переходу луговых сообществ в лесные. Более четкий тренд подобной динамики выявлен для зарастающих пашен, нежели для сенокосов, а также для песчаных почв, нежели для глинистых.

**Содержание органического углерода в почве.** Наибольшее увеличение содержания органического углерода в верхнем слое почвы (0–10 см) в ходе постагрогенной сукцессии от стадии пашни до стадии 100-летнего смешанного леса выявлено для зарастающей пашни, почвы которой сформированы на легких отложениях (ряд МП) – более чем в 4 раза. На ранних стадиях это, вероятно, определяется влиянием дернины и поступлением большого количества травяного опада в почву, на более поздних – поступлением листового опада

древесного яруса. По-видимому, не очень высокий уровень агротехнических мероприятий не способствует накоплению органического вещества в почве пашни, и после прекращения распашки этот показатель стремится к исходным значениям, характерным для целинных почв – подобные результаты были получены многими авторами [1, 40]. Для сравнения можно рассмотреть зарастающую пашню на суглинистых породах – ряд ПП. Поскольку содержание органического углерода в почве пашни крайне низкое, можно сделать вывод о невысоком уровне агротехнических мероприятий, как и в случае зарастающей пашни в ряду МП. При этом градиент возрастания содержания углерода в ходе постагрогенного лесовосстановления не столь велик. Дело в том, что в фоновой дерново-подзолистой почве ПП100 органофиль не столь грубогумусный, как в почве МП100 – подзоле. В целом направление постагрогенной динамики содержания углерода в верхнем слое такое же, как и в почве на песчаных породах. Оба ряда объединяет то, что на стадии 100-летнего леса возрастание содержания углерода ограничивается верхними 10 см. Зарастание сенокосных лугов сопровождается, напро-

тив, некоторым уменьшением содержания органического углерода, хотя и выраженным не слишком отчетливо. В ряду МС наименьшее содержание углерода характерно для стадии 12-летней залежи по сенокосу (МС12), когда продуктивность травяного яруса сильно снижена, тогда как сомкнутый древостой, который поставлял бы достаточное количество опада, еще не сформировался — здесь рост древостоя происходит медленнее, чем на залежи по заброшенной пашне аналогичного возраста (МП12). Если сравнить почвы пашни и сенокоса в Парфеньевском районе, одинаковых по гранулометрическому составу, то видно, что содержание углерода в почве сенокоса гораздо больше — несмотря на периодическое отчуждение травостоя, продуктивность последнего благодаря кошению поддерживается на высоком уровне, что не может не отражаться на гумусном состоянии почвы.

**Стратификационное отношение органического вещества почв.** При ослаблении агротехнической обработки почв, а еще сильнее при зарастании выведенных из сельскохозяйственного оборота пахотных земель изменяются не только почвенные свойства, но и их распределение с глубиной. Стратификационное отношение (SR — stratification ratio) органического вещества почв было выбрано в качестве индикатора их качества [39]. Концепция качества почвы основана на представлении о том, что управление может ухудшить или улучшить экологические функции почв. Так как в большинстве случаев в почвах под естественной растительностью органическое вещество более стратифицировано по глубине по сравнению с пахотными предполагается, что при искусственном или естественном восстановлении растительного покрова SR увеличивается, что свидетельствует об улучшении экологического качества почв. В настоящее время стратификационное отношение используется не только в качестве показателя качества почв, но и для оценки секвестрации углерода [37, 46, 48]. Величина SR зависит от выбора глубины и мощности почвенных слоев, используемых при определении этого показателя. Рекомендуется рассчитывать стратификационные отношения для слоев 0–10/20–30 или 0–20/20–40 см [39]. В табл. 3 приведены стратификационные отношения, вычисленные как отношения запасов органического углерода в слоях 0–10 и 20–30 см почв двух хронорядов, представляющих естественное лесовосстановление на пашне. Они показывают, как изменяется степень дифференциации старопахотного горизонта по запасам органического вещества с возрастом залежи. По полученным данным при переходе от пашни к вторичным лесам стратификационные индексы возрастают в 2.6–3.0 раза. Однако величины SR и динамика их изменений в изучаемых хронорядов существенно различают-

ся. Они определяются предысторией пахотных почв, их типом, свойствами, особенностями почвообразующих пород и скоростью восстановления лесной растительности. Зарастание пашни на агродерново-подзолах легкого гранулометрического состава (хроноряд МП) характеризуется высокой для пашни величиной стратификационного отношения по сравнению с литературными данными [39]. При переходе к луговой стадии оно довольно резко увеличивается в 1.7 раза, а затем уменьшается в 40-летнем мелколиственном лесу. Снижение SR может быть связано с увеличением подвижности органического вещества в почве лесного фитоценоза, а также с завершением деградации дернового горизонта. В почве вторичного 100-летнего леса стратификационное отношение очень высокое, что обусловлено особенностями органофилия подзолов. При зарастании агродерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (хроноряд ПП) наблюдается иная динамика SR. Низкое стратификационное отношение в пахотной почве очень постепенно увеличивается в 1.4 раза на стадии леса 40–50 лет и только на стадии 80–100-летнего леса оно возрастает в 3 раза по сравнению с пашней.

#### *Микробиологические свойства постагrogenных почв*

Углерод микробной биомассы является показателем, весьма чувствительным как к землепользованию, так и к смене растительности [35, 47]. Таким образом, динамика его содержания и отношения к содержанию общего углерода почвы в ходе естественного постагrogenного лесовосстановления очень важна для понимания динамики процессов, происходящих в системе опад–микробиота–органическое вещество почв. Данные, полученные в результате настоящих исследований, показывают, что в целом при зарастании заброшенных пахотных угодий микробная биомасса в верхних минеральных горизонтах почв существенно увеличивается (табл. 4). Возможно, это связано с бурным ростом травяной растительности и поступлением большого количества разнообразного легкоразлагаемого опада после прекращения распашки. Особенно это заметно на песчаной почве (залежь 7 лет в ряду МП), что объясняется большей интенсивностью развития корневых систем на легких почвах. Следующий пик значения содержания углерода микробной биомассы в обоих рядах соответствует 100-летнему лесу, что, возможно, связано с ростом грибной биомассы по сравнению с бактериальной в связи с изменением характера органофилия по сравнению с почвами более молодых лесов.

При зарастании сенокоса, напротив, наблюдается уменьшение содержания микробной биомассы с некоторым возрастанием лишь, на стадии смешанного леса большого возраста. Наименьшее содер-



**Таблица 3.** Изменение стратификационного отношения (SR) в ходе естественного лесовосстановления на пашне

| Стадия сукцессии                       | Глубина, см | Запасы С, кг/м <sup>2</sup> | SR    |
|--|-------------|-----------------------------|-------|
| Зарастающая пашня, Парфеньевский район |             |                             |       |
| ПП0, пашня                             | 0–10        | 0.71                        | 1.25  |
|  | 20–30       | 0.57                        |       |
| ПП7, залежь 7–11 лет                   | 0–10        | 1.05                        | 1.38  |
|  | 20–30       | 0.76                        |       |
| ПП20, залежь 20–24 лет                 | 0–10        | 1.39                        | 1.61  |
|  | 20–30       | 0.86                        |       |
| ПП40, лес 40–50 лет                    | 0–10        | 2.09                        | 1.71  |
|  | 20–30       | 1.22                        |       |
| ПП100, лес 80–100 лет                  | 0–10        | 1.44                        | 3.79  |
|  | 20–30       | 0.38                        |       |
| Зарастающая пашня, Мантуровский район  |             |                             |       |
| МП0, пашня                             | 0–10        | 1.11                        | 4.11  |
|  | 20–30       | 0.27                        |       |
| МП7, залежь 7–10 лет                   | 0–10        | 1.75                        | 7.00  |
|  | 20–30       | 0.25                        |       |
| МП12, залежь 12–15 лет                 | 0–10        | 2.16                        | 7.20  |
|  | 20–30       | 0.30                        |       |
| МП40, лес 40 лет                       | 0–10        | 2.21                        | 1.81  |
|  | 20–30       | 1.22                        |       |
| МП100, лес 100 лет                     | 0–10        | 3.92                        | 10.60 |
|  | 20–30       | 0.37                        |       |

**Таблица 4.** Микробная биомасса

| Стадия сукцессии                        | Горизонт | Глубина, см | С <sub>мик</sub> , мкг С/г почвы | $\frac{C_{\text{мик}}}{C_{\text{орг}}}$ , % |
|---|----------|-------------|----------------------------------|---|
| Зарастающая пашня, Мантуровский район   |          |             |                                  |   |
| МП0                                     | Р        | 0–15        | 262.0 ± 20                       | 2.4   |
| МП7                                     | АУра     | 0–15        | 355.2 ± 10                       | 2.3   |
| МП12                                    | АУра     | 0–15        | 337.8 ± 15                       | 1.8   |
| МП40                                    | АУра     | 0–15        | 281.5 ± 10                       | 1.1   |
| МП100                                   | АН       | 4–10        | 499.5 ± 35                       | 1.2   |
| Зарастающий сенокос, Мантуровский район |          |             |                                  |   |
| МС2                                     | АУра     | 0–15        | 262.0 ± 15                       | 1.1   |
| МС12                                    | АУра     | 0–15        | 202.7 ± 5                        | 2.0   |
| МС20                                    | АУра     | 0–15        | 105.0 ± 5                        | 0.6   |
| МС95                                    | АУра     | 0–15        | 142.7 ± 20                       | 0.6   |
| Зарастающая пашня, Парфеньевский район  |          |             |                                  |   |
| ПП0                                     | Р        | 0–12        | 175.0 ± 5                        | 2.5   |
|   |          | 12–24       | 150.0 ± 15                       | 2.1   |
| ПП11                                    | АУра     | 0–13        | 180.0 ± 25                       | 2.0   |
|   |          | 13–26       | 130.0 ± 5                        | 1.6   |
| ПП24                                    | АУра     | 0–12        | 150.0 ± 5                        | 1.1   |
|   |          | 13–25       | 135.0 ± 4                        | 1.6   |
| ПП50                                    | АУра     | 0–10        | 350.0 ± 25                       | 1.3   |
|   |          | 11–21       | 300.0 ± 20                       | 1.9   |
| ПП100                                   | АУра     | 0–10        | 400.0 ± 35                       | 3.0   |
|   |          | 11–25       | 250.0 ± 20                       | 3.0   |

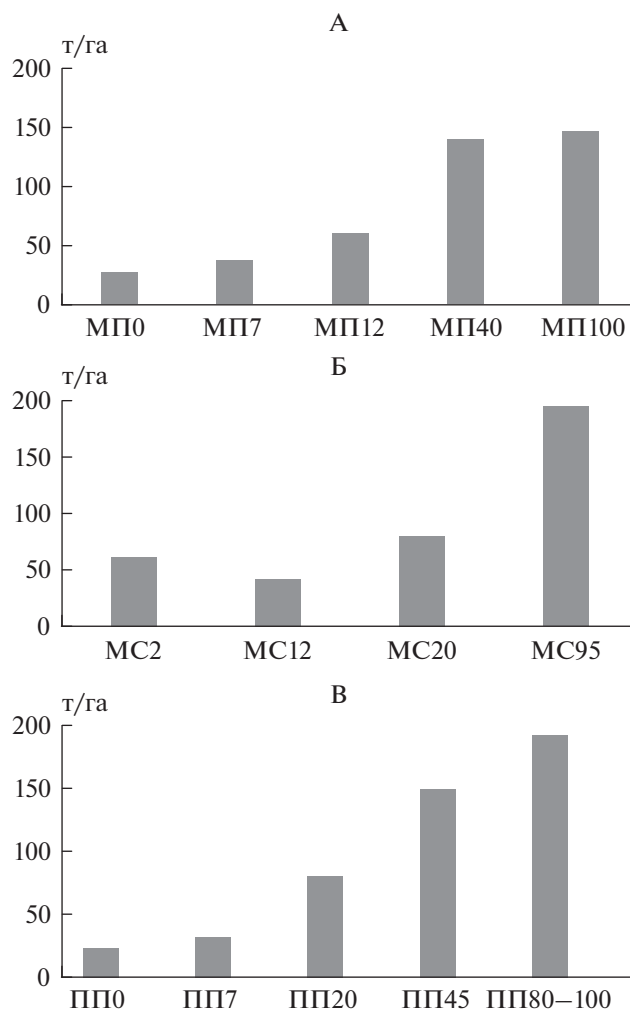
жание микробной биомассы, как и при зарастании пашен, соответствует молодому мелколиственному лесу. Возможно, потому что дернового горизонта как такового уже нет в связи с частичной деградацией травяного яруса, но и еще не развита в полном объеме лесная подстилка как местообитание почвенной микробиоты, т.е. создается некоторый дефицит доступного органического вещества. Таким образом, с возрастом вторичной лесной растительности происходит восстановление микробной биомассы до уровня естественной экосистемы. Наибольшая доля углерода микробной биомассы в общем органическом углероде почвы соответствует, как правило, пахотным почвам и молодым залежам. Возможно, это обусловлено исключительно обратной связью коэффициента  $C_{\text{мик}}/C_{\text{общ}}$  с общим содержанием углерода.

#### *Соотношение запасов углерода в разных компонентах экосистем*

По мере восстановления естественной растительности общий запас углерода в экосистеме существенно возрастает (рис. 1), что говорит о стремлении системы к первоначальному состоянию, которое предшествовало антропогенному освоению. Так, при зарастании пашни на песчаных почвах примерно за 100 лет общий запас органического углерода увеличивается в 7 раз, при зарастании пашни на суглинистых породах — в 9 раз, при зарастании сенокоса — в 3.5 раза.

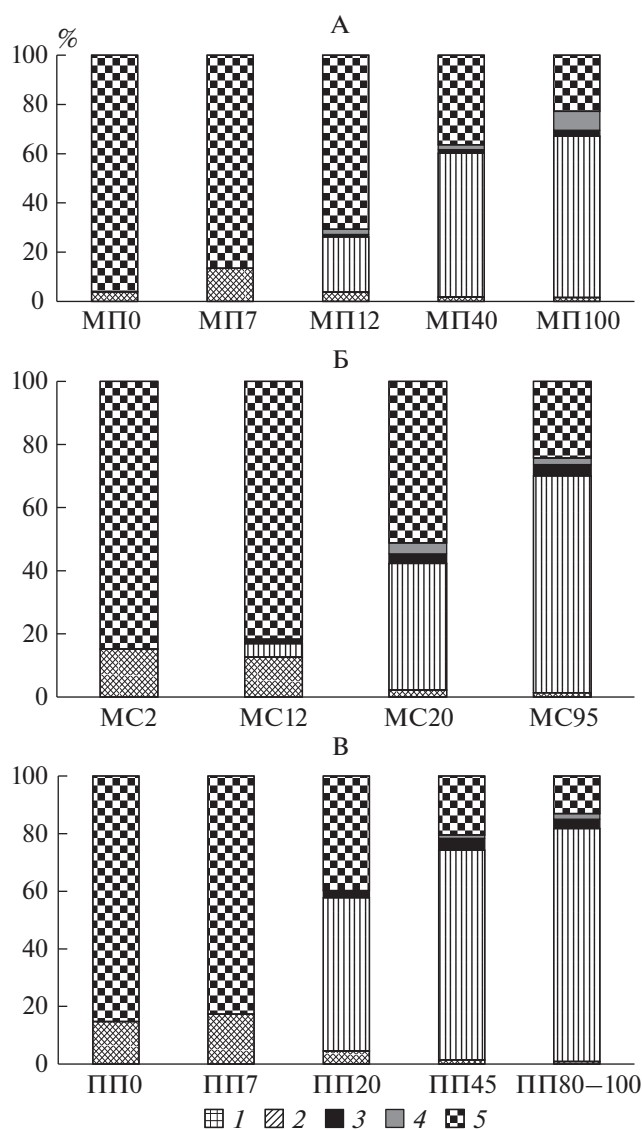
Интересно отметить, что на 12-летних залежах по пашне и сенокосу (рис. 1А, 1Б) общий запас углерода существенно различается — в биогеоценозе МП12 он больше в 1.5 раза. По-видимому, при лесовосстановлении по пашне по причине отсутствия долго формировавшейся дернины рост и развитие древостоя происходит быстрее [25]. На стадии 95–100-летних смешанных лесов общие запасы углерода в экосистемах на суглинистых почвах превышают аналогичные на песчаных почвах, что говорит о сравнительно более оптимальных почвенно-растительных условиях в лесах, развитых на суглинистых почвах.

Запасы органического углерода в старопашотной части профиля (0–30 см) увеличиваются в процессе зарастания пашни как на песчаных, так и на суглинистых почвах, достигая максимального значения, по-видимому, между 20 и 45 годами после прекращения распашки. В целом это соответствует данным, полученным при расчете динамики запасов углерода с помощью модели NAMSOM — при выводе из использования слабокультуренных почв любого гранулометрического состава запасы увеличиваются [27]. На поздних стадиях сукцессии, соответствующих выходу хвойных пород в доминанты в древостое, запасы углерода в минеральной старопашотной толще напротив, начинают уменьшаться по причине смены характе-



**Рис. 1.** Постагрогенная динамика запасов углерода, т/га в биогеоценозе. А — зарастающая пашня, Мантуровский район, Б — зарастающий сенокос, Мантуровский район, В — зарастающая пашня, Парфеньевский район.

ра органофилия и перехода основных запасов почвенного органического вещества в подстилку, что особенно характерно для почв, образованных на песчаных породах. Что касается почв зарастающего сенокоса, динамика запасов органического углерода в старопашотной толще (сенокос образован на месте пашни) отличается. Прежде всего, запасы углерода в почвах изучаемых сенокосных лугов превышают запасы углерода в почве пашни в 2 раза, поскольку баланс поступающего органического вещества совершенно разный при распашке и при сенокосе. Во-первых, если после распашки поступление в почву травяного опада резко увеличивается, то после прекращения сенокоса — напротив, уменьшается в результате снижения продуктивности травостоя. Во-вторых, как уже было сказано, восстановление древостоя после прекращения сенокоса происходит медлен-



**Рис. 2.** Соотношение запасов углерода в разных блоках биогеоценозов. А – зарастающая пашня, Мантуровский район, Б – зарастающий сенокос, Мантуровский район, В – зарастающая пашня, Парфеньевский район. 1 – травяно-кустарничковый и моховый ярусы, 2 – многолетние части древостоя, 3 – зеленые части древостоя, 4 – лесная подстилка, 5 – почва на глубине 0–30 см.

нее, чем после распашки, поэтому имеет место некоторый “временной разрыв” между деградацией дернового горизонта и формированием лесного органо профиля с развитой подстилкой, поэтому появляется углеродный минимум, соответствующий 10–12 годам. Далее запасы органического углерода начинают возрастать, как и при зарастании пахотных угодий.

Соотношение запасов органического углерода в разных блоках экосистемы неодинаково на разных стадиях постагрогенного лесовосстанов-

ления (рис. 2). На ранних стадиях сукцессии, соответствующим луговым экосистемам, доля углерода минеральной части почвы составляет более 80%, в экосистемах молодых вторичных лесов 20-летнего возраста – не более 40–50%, тогда как в экосистемах смешанных лесов 95–100 лет – не более 20%. При этом абсолютный запас почвенного углерода, а также детрита, напротив, увеличивается по мере развития древостоя, а на завершающих стадиях сукцессии если уменьшается, то незначительно. Доля запасов детрита, который появляется при переходе лугового фитоценоза в лесной, увеличивается, особенно в экосистеме леса, сформированного на песчаных почвах (до 10%). Доля запасов углерода травостоя, напротив, постепенно сходит на нет через 20 лет после прекращения распашки или сенокосения, в то время как растет доля ассимилирующих частей древостоя (хвоя и листва). Таким образом, запасы углерода в экосистеме увеличиваются, главным образом, за счет древостоя, а именно его многолетних частей – стволов, ветвей и многолетних корней, в результате вторичные леса являются существенным стоком атмосферного углерода.

## ВЫВОДЫ

1. По мере постагрогенного восстановления растительности происходит подкисление почв в старопашотной толще. Характер тренда этого процесса определяется гранулометрическим составом почв и историей освоения – более существенное и быстрое увеличение кислотности выражено на легких почвах по сравнению с тяжелыми и на почвах заброшенных пашен по сравнению с заброшенными сенокосами.

2. Выявлено уменьшение суммы обменных оснований в старопашотной толще, особенно в верхних 10–20 см в ходе постагрогенной сукцессии, выраженное в большей степени в почвах, сформированных на легких породах, где градиент этого показателя между зональной и освоенной почвой максимален. Уменьшение суммы обменных оснований связано с изменением количества и состава растительного опада, особенно фракции, наиболее обогащенной зольными элементами – травянистые растения и листва мелколиственных пород.

3. Характер изменения содержания органического углерода в старопашотной толще по мере восстановления растительности определяется типом использования угодья, поскольку почва постепенно возвращается к первоначальному состоянию. После прекращения распашки содержание углерода увеличивается за 100 лет примерно в 2 раза в суглинистых почвах и в 4 раза в песчаных – скорость этого процесса обусловлена уже нативными свойствами почвы. Для почв зарастающих сенокосов отчетливый тренд динамики содержания углеро-

да не выявлен из-за наличия ряда осложняющих факторов, таких как периодичность кошения и продуктивность травостоя.

4. По мере восстановления лесной растительности происходит постепенная дифференциация старопахотной толщи по содержанию и запасам органического углерода, максимально выраженная в почвах субклимаксных смешанных лесов 90–100 лет.

5. Микробная биомасса в верхних минеральных горизонтах почв увеличивается при прекращении распахки на время, соответствующее луговым сообществам молодых залежей, а также при формировании субклимаксного смешанного леса с развитой лесной подстилкой. После прекращения сенокоса значение микробной массы, напротив, несколько уменьшается из-за сокращения продуктивности травостоя.

6. При зарастании заброшенной пашни общий запас органического углерода в экосистеме возрастает за 100 лет в 7 раз на песчаных породах, в 9 раз — на суглинистых, при зарастании сенокоса на легких породах — в 3,5 раза. Через 20 лет после прекращения использования доля почвенного углерода в общих запасах составляет менее 50%, и дальнейшее накопление углерода осуществляется, главным образом, за счет многолетних частей древостоя, что обеспечивает сток атмосферного углерода. Доля детрита также возрастает, особенно в лесных экосистемах на песчаных почвах с органопротилем типа мор — до 10% в общем запасе.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-04-00773.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольникова Е.В.* Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1108–1116.
2. *Артёмьева З.С., Рыжова И.М., Силёва Т.М., Ерохова А.А.* Стабилизация органического углерода в микроагрегатах дерново-подзолистых почв в зависимости от характера землепользования // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2013. № 3. С. 19–26.
3. *Болысов С.И., Фузеина Ю.Н.* Физико-географические условия Костромского Заволжья. Геолого-геоморфологическое устройство // Костромское Заволжье: природа и человек. М., 2001. С. 36–60.
4. *Владыченский А.С., Телеснина В.М.* Изменение некоторых свойств таежных почв при прекращении из сельскохозяйственного использования (на примере Костромской области) // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. Т. 3. № 3.
5. *Владыченский А.С., Телеснина В.М.* Сравнительная характеристика постагрогенных почв южной тайги в разных литологических условиях // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2007. № 4. С. 3–11.
6. *Владыченский А.С., Рыжова И.М., Телеснина В.М., Галиахметов Р.Т.* Пространственно-временная динамика содержания органического углерода в дерново-подзолистых почвах постагрогенных БГЦ // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2009. № 2. С. 3–9.
7. *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. 518–529.
8. *Гончарова И.Б., Востокова Л.Б.* Биологическая продуктивность и зольный состав растительности аллювиальных луговых почв поймы Северной Двины // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1992. № 4. С. 17–25.
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. *Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н.* Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.
11. *Казакова А.И., Семиколенных А.А., Горнов А.В., Горнова М.В., Лукина Н.В.* Влияние растительности на лабильные характеристики лесных почв задровых местностей заповедника “Брянский лес” // Вестник Моск. ун-та, сер. 17. Почвоведение. 2018. № 3. С. 9–15.
12. *Караваева Н.А.* Агрогенные почвы: условия среды, процессы, свойства // Почвоведение. 2005. № 12. С. 1518–1529.
13. *Карелин Д.В., Люри Д.И., Горячкин С.В., Лунин В.Н., Кудиков А.В.* Изменение почвенной эмиссии диоксида углерода в ходе постагрогенной сукцессии в черноземной лесостепи // Почвоведение. 2015. № 11. С. 1354–1366  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X1511009X>
14. *Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И.* Изменение запасов углерода и эмиссии CO<sub>2</sub> в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580–594.
15. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
16. *Копцик Г.Н., Курпьянова Ю.В., Кадулин М.С.* Пространственная изменчивость эмиссии диоксида углерода в основных типах лесных экосистем Звенигородской биостанции МГУ им. М.В. Ломоно-

- сова // Вестник Моск. ун-та, сер. 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 40–47.
17. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераскина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803–816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>
  18. Литвинович А.В. Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв северо-запада Нечерноземной зоны // Агрехимия. 2009. С. 85–93.
  19. Литвинович А.В., Плылова И.А. Изменение кислотно-основных свойств дерново-подзолистой суглинистой почвы в процессе постагрогенной эволюции // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования. СПб., 2009. С. 160–164.
  20. Лукина Н.В., Орлова М.А., Бахмет О.Н., Тихонова Е.В., Тебенькова Д.Н., Казакова А.И., Крышень А.М., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Шашков М.П., Ершов В.В., Князева С.В. Влияние растительности на характеристики лесных почв республики Карелия // Почвоведение. 2019. № 7. С. 827–842. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050071>
  21. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010.
  22. Люри Д.И., Карелин Д.В., Кудиков А.В., Горячкин С.В. Изменение почвенного дыхания в ходе постагрогенной сукцессии на песчаных почвах в южной тайге // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1060–1072.
  23. Макаров И.Б. Дифференциация пахотного горизонта дерново-подзолистых почв в условиях их окультуривания. Автореф. ... дис. канд. биол. наук. М., 1981. 249 с.
  24. Матинян Н.Н., Бахматова К.А., Алексеев С.С. Постагрогенная трансформация почв, сформированных на контрастных по гранулометрическому составу породах // Гумус и почвообразование. СПб., 2007. С. 52–60.
  25. Морозов А.М., Николаева И.О. Особенности лесообразовательного процесса на пашне и сенокосе // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2013. № 5(103). С. 82–86.
  26. Огурева Г.Н. Ботанико-географическое районирование СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 76 с.
  27. Овсянян Л.А. Постагрогенная динамика запасов и состава органического вещества серых лесных почв московской области // Материалы по изучению русских почв. Вып. 9(36). СПб., 2017. С. 229–232.
  28. Ремезов Н.П., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. М.: Лесная промышленность, 1965. 323 с.
  29. Романовская А.А., Коротков В.Н., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С. Динамика элементов баланса углерода на неиспользуемых пахотных угодьях Валдайской возвышенности // Экология. 2012. № 5. С. 347–352.
  30. 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>
  31. 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.
  32. 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.
  33. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсянян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мирин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.
  34. Чернов Д.В., Кириллова Е.Л. Особенности морфологии дерново-подзолистых целинных, пахотных и залежных почв // Гумус и почвообразование. СПб., 2000. С. 145–152.
  35. Bosatta E., Agren G.I. Theoretical analysis of microbial biomass dynamics in soil // Soil Biol. Biochem. 1994. V. 26. P. 143–148.
  36. Collins H.P., Elliot E.T., Paustian K., Bundy L.G., Dick W.A., Huggins D.R., Smucker A.J. M., Paul E.A. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32. № 2. P. 157–168.
  37. De Oliveira Ferreira A., Jorge Carneiro Amado T., Da Silveira Nicoloso R., De Moraes Sa J.C., Ernani Fiorin J., Santos Hansel D.S., Menefee D. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil // Soil Tillage Res. 2013. V. 133. P. 65–74.
  38. Falkengren-Grerup U., Brink D.-J., Brunet J. Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40–80 years of forest growth on agricultural soils // Forest Ecol. Manag. 2005. V. 225.
  39. Franzluebbers A.J. Depth distribution of soil organic carbon as a signature of soil quality // 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, 2010. P. 1–4.
  40. 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. V. 152. № 1. P. 35–42.
  41. Kalinina O., Krause S.-E., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic chernozems of Russia: soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2011. V. 162. P. 196–206.
  42. Kalinina O., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Vormstein S., Giani L. Self-restoration of post-agrogenic Albeluvisols: Soil development, carbon stocks and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2013. V. 207–208. P. 221–233.
  43. Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Luise Giani. Post-agrogenic development of vegetation, soils, and

- carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // *Catena*. 2015. V. 129. P. 18–29.
44. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y.* Carbon cost of collective farming collapse in Russia // *Glob. Change Biol.* 2014. V. 20. P. 938–947.
45. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // *Catena*. 2015. V. 133. P. 461–466.
46. *Lopez-Fando C., Pardo M.T.* Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region // *Soil Tillage Res.* 2011. V. 111. P. 224–230.
47. *Wolters V., Joergensen R.G.* Microbial carbon turnover in beech forest soil at different stages of acidification // *Soil Biol. Biochem.* 1991. V. 23. P. 897–202.
48. *Xu M., Wang Z., Zhao Yu.* Stratification ratio of soil organic carbon as an indicator of carbon sequestration and soil quality in ecological restoration // *Restoration Ecology*. 2017. <https://doi.org/10.1111/rec.12597>

## Dynamics of Soils Properties and Carbon Stocks Structure in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga during Natural Forest Restoration

I. M. Ryzhova<sup>1</sup>, V. M. Telesnina<sup>1, \*</sup>, and A. A. Sitnikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: vtelesnina@mail.ru*

The dynamics of some soil properties, as well as carbon stocks, in the main components of postagrogenic ecosystems during natural reforestation, depending on lithological conditions and the nature of former land use were studied with the example of four chronosequences in Kostroma oblast. In the course of forest restoration, soil acidity increases and the content of exchangeable bases decreases in the upper part of the soil profile; this trend is better pronounced in sandy soils. The content and stocks of organic carbon dynamics are determined by the land use type, while the intensity of the postagrogenic dynamics is determined by the native properties of the soil. As forest vegetation is restored, a gradual differentiation of the arable layer according to its carbon content and reserves is going on, and it is most pronounced in 90–100 year-old forest soils. Approximately during 100 years, the total stock of organic carbon in an ecosystem increases by 7–9 times when overgrowing the arable land, and by 3.5 times in case of hayfields overgrowing. The structure of ecosystem carbon deposit changes – soil carbon part decreases from 80 to 50% for 20 years, while detritus part increases by 10%.

*Keywords:* abandoned lands, carbon, post-agrogenic soils, succession, Albic Podzol, Albic Retisol