

УДК 630\*1

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59

## ДИНАМИКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЛЕСОВ НА ПОСТАГРОГЕННЫХ ЗЕМЛЯХ

*Е.Н. Наквасина<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>*

*Ю.Н. Шумилова<sup>2</sup>, канд. геогр. наук, доц.; ResearcherID: [ABH-6497-2020](https://orcid.org/0000-0002-6736-0268),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6736-0268>*

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

<sup>2</sup>Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: j.shumilova@sevniilh-arh.ru

**Аннотация.** На примере подобранного хроноряда залежей (4 пробные площади с разной длительностью отчуждения: 16 лет, 25 лет, 63 года и 130 лет) в Каргопольском районе Архангельской области (средняя подзона тайги, остаточно-карбонатные почвы) проведены расчеты запасов углерода в различных компонентах биогеоценоза (почва, живой напочвенный покров, лесная подстилка, подрост, подлесок и древостой). Дана оценка структуры запасов углерода формирующихся насаждений и ее изменения с возрастом залежи. Определено, что в процессе сукцессии при облесении пашен происходит закономерное увеличение запасов углерода и его перераспределение между почвой и формирующимся фитоценозом. В насаждениях на молодых залежах более 86 % запаса углерода представлено углеродом пахотного горизонта почвы. В ходе зарастания залежи лесной растительностью доля этого пула уменьшается и уже в средневозрастном 63-летнем лесу составляет 22 %, а в спелом 130-летнем – всего 7,6 %. В средневозрастном насаждении в структуре общего запаса углерода доля древостоя достигает 69 %, а в спелом 130-летнем – уже 90 %. В насаждениях на молодых залежах структура главных компонентов биогеоценоза (почвенный углерод : углерод напочвенного покрова : углерод древесного яруса) характеризуется соотношением 9:1:0, тогда как в насаждениях на старых залежах 63-летнего и 130-летнего возраста – 2:0:8 и 1:0:9 соответственно. Для подроста и подлеска изучаемого хроноряда характерны небольшие доли углерода, не имеющие существенного значения в углеродном пуле экосистемы. Лесная подстилка в формирующихся лесных насаждениях вносит весомый вклад в структуру углерода биогеоценоза, хотя в общем пуле углерода биогеоценоза составляет 3...4 % и не способствует увеличению запасов углерода в почве. В системе «почва – лесная подстилка – живой напочвенный покров» доля углерода почвы с увеличением возраста насаждения снижается от 91 до 76...77 %, а доля формирующейся подстилки в средневозрастном и спелом лесу – 16 и 20 % соответственно. В насаждениях на молодых залежах это соотношение составляет 9:0:1, тогда как на старых – 8:2:0. Оставление пахотных земель на остаточно-карбонатных почвах под самозарастание лесной растительностью и формирование на них лесных насаждений в подзоне средней тайги приведут к постепенному снижению углеродного пула в почве, но будут способствовать секвенированию углерода в фитомассе многолетней древесной растительности и в лесной подстилке. Эти два компонента биогеоценоза будут служить депо секвенированного углерода, поддерживая биологический круговорот веществ в насаждении.

**Для цитирования:** Наквасина Е.Н., Шумилова Ю.Н. Динамика запасов углерода при формировании лесов на постагроденных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59

**Финансирование:** Исследования частично поддержаны грантом РФФИ и правительства Архангельской области № 17-44-290111 и основаны на описаниях пробных площадей, входящих в базу данных кафедры лесоводства и лесоустройства САФУ.

**Ключевые слова:** залежи, постагrogenные леса, хроноряд, запасы углерода, компоненты биогеоценоза, почва, древостой, лесная подстилка.

### *Введение*

Учет аккумуляции углерода в почвах и растительности экосистем в настоящее время стал необходим для прогнозирования его динамики при разных сценариях землепользования, а также в связи с климатическими изменениями. Большое значение придается региональным исследованиям и моделированию секвестирования углерода [1, 14, 15, 17, 22,]. Однако региональная оценка запасов углерода требует проведения локальных исследований [5], в том числе с использованием метода хроносеквенции, который позволяет проследить динамику запасов углерода при разных сценариях земле- и лесопользования [25–27, 31, 32].

Особый интерес в настоящее время вызывает изучение хронорядов при изменении землепользования, что обусловлено выводом из активного сельскохозяйственного оборота в России более 40 млн га угодий в конце XX в. [10]. В таежной зоне залежи зарастают лесной растительностью, поэтому важно проследить особенности натурализации и динамику пулов углеродного баланса на таких землях.

Несомненно, что при облесении залежей процессы восстановления растительного покрова идут в направлении формирования зональных экосистем в ненарушенном состоянии [9, 19], что соответствует соотношению запасов почвы и растительности 1:4 для подзоны средней тайги [7]. При облесении запасы углерода в фитомассе и лесной подстилке (напочвенное образование) повышаются за счет формирования лесного фитоценоза [17], тогда как почвенный пул меняется медленно [26].

О формировании углеродного пула в почвах при облесении пашен нет единого мнения, по одним данным, запасы углерода в почве повышаются, по другим – понижаются или находятся в стабильном состоянии [11, 17, 22, 25, 26, 28, 30]. Однако по сравнению с темпами накопления фитомассы эти колебания невелики [30]. Показано, что они могут зависеть от климатических условий региона исследований, в частности от увлажненности почвы, количества осадков [1, 2, 21, 34], породного состава и возраста насаждений [1, 17, 21, 25, 29, 31], свойств почв и почвообразующих пород, в том числе от их карбонатного генезиса [17, 24, 25]. Эти изменения определяют пул микробного сообщества в почве, связанного с биохимическим циклом углерода [8, 33]. Нельзя также исключать и характер предшествующего использования угодий, так как именно это способствует сохранению большого количества травянистой растительности в напочвенном покрове формирующихся лесов [1], которое оказывает влияние на биологический круговорот веществ в системе «почва – фитоценоз» в период сукцессионных изменений в экосистемах [12].

Цель наших исследований – проследить на примере хроноряда пробных площадей динамику изменения пулов углерода в структуре компонентов биогеоценоза при облесении пашен на азональных почвах в Каргопольском районе Архангельской области.

*Объекты и методы исследования*

Каргопольский район Архангельской области относится к подзоне средней тайги, для него характерно распространение дерново-подзолистых остаточно-карбонатных (текстурно-метаморфических грубогумусированных остаточно-карбонатных) почв, сформированных на близко залегающих карбонатной морене и известковой плите. Иногда их называют северные «рендзины» [20]. Эти почвы отличаются от зональных подзолистых почв на силикатных породах высоким плодородием при несовместимых свойствах (поверхностное оподзоливание и окарбончатность нижних горизонтов) и широким использованием в сельском хозяйстве.

Для расчетов запасов углерода был подобран хроноряд залежных объектов (пашен), зарастающих лесной растительностью (преимущественно хвойными породами) и находящихся на разных стадиях сукцессии, из 4 пробных площадей с разной длительностью отчуждения из активного сельскохозяйственного пользования.

16-летняя залежь представляет собой заброшенное поле севооборота, на котором в течение 5 лет проводилось сенокосение. В настоящее время в напочвенном покрове сформировалась злаково-бобово-разнотравная ассоциация (всего 25 видов). Преимущественное распространение имеют *Dactylis glomerata* L. и *Amoria pretense* C. Prest. В моховом ярусе единично распространены *Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst. и *Dicranum scoparium* Hedw. Древесная растительность, распространившаяся от стен леса, представлена 74E2C4Лц20Ол, густота 760 шт./га, средняя высота 1,5 м. Повсеместно по площади поля встречаются виды *Salix* (sp.) и *Rosa majalis* Herzm. в количестве 1 шт./га.

В насаждении на 25-летней залежи после отчуждения из активного использования в севообороте промежуточное пользование продолжалось 10 лет, что привело к угнетению разрастания древесной растительности, численность которой – 180 шт./га, состав – 55С33Е12Б, высота не превышает 1,0 м, что ниже, чем на предыдущей залежи. Подлесочные породы представлены кустовыми видами *Salix* (sp.) (120 шт./га), напочвенный покров – хорошо сформированной злаково-бобово-разнотравной ассоциацией (25 видов), в которой доминируют *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., *Amoria pretense*. Моховой ярус состоит из 4 видов с преимущественным распространением *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *Rhytidiadelphus triquetrus* с незначительным проективным покрытием.

63-летнее насаждение на пашенной залежи длительного пользования представляет собой сосновый древостой (состав 10С+Е, средняя высота 16,3 м, средний диаметр 20,5 см, густота 940 шт./га), под пологом которого сформировался достаточно густой подрост (4920 шт./га, состав 50Е50Ос), а также подлесочный ярус, состоящий из *Salix* (sp.) (доля в составе 36 %), *Rosa majalis* (28 %), *Juniperus communis* L. (18 %), *Sorbus aucuparia* L. (9 %) и *Padus racemosa* (Lam.) Gilib. (9 %) в количестве 110 шт./га. Несмотря на формирование лесной обстановки, доминантами живого напочвенного покрова (19 видов) являются *Amoria pretense* и *Melica nutans* L. Из лесных видов встречаются *Rubus saxatilis* L., *Luzula DC. pilosa* (L.) Willd., *Potentilla erecta* (L.) Raeusch. и др. Моховой ярус хоро-

по сформирован преимущественно двумя видами мхов: *Pleurozium schreberi* и *Rhytidiadelphus triquetrus*.

130-летняя залежь на заброшенном постоянном лесном питомнике представлена лиственничником (100 Лц). Густота насаждения всего 290 шт./га при средних высоте древостоя 27,1 м и диаметре 42,2 см. Из-за периодической рекреационной нагрузки в отдельные годы (близость к населенному пункту) подрост неразвит (состав 64Е36Лц, густота 140 шт./га при средней высоте 1,5 м). Подлесочные породы состоят из *Sorbus aucuparia* (доля в составе 66 %), *Ribes nigrum* L. (26 %), *Padus racemosa* (Lam.) Gilib. (5 %), *Juniperus communis* (2 %) и *Salix* (sp.) (1 %). Живой напочвенный покров (16 видов) представлен луговыми и лесными растениями, в числе доминантов *Deschampsia cespitosa*, *Milium effusum* L., *Aegopodium podagraria* L., *Fragaria vesca* L., *Rubus saxatilis* L. и др. Широко распространены 2 вида мха с преобладающим покрытием (95 %) *Rhytidiadelphus triquetrus*.

При описании почвенного разреза, необходимого для идентификации пашенного состояния угодий, обращали внимание на сохранившиеся признаки наличия пахотного горизонта. Особенно это имело значение при подборе лесных участков пахотного генезиса. Старопахотный горизонт имел признаки пашенного состояния (равномерную окраску, сохранившуюся структуру и достаточно ровную нижнюю границу), отличавшие его от нативных лесных почв без признаков сельскохозяйственного воздействия.

В сформированных лесных насаждениях лесная подстилка имеет небольшую мощность (табл. 1), что связано с большим разнообразием легко-разлагающейся травянистой растительности в напочвенном покрове. Отсутствие кустарничков в нем поддерживается нейтральной реакцией среды верхнего горизонта почвы, характерной для окарбончатых почв. Подкисления верхней толщи почвы при разрастании древесной растительности на данных участках не наблюдалось. Близкое залегание карбонатных пород поддерживает плодородие почв в процессе их сукцессионного самозарастания.

Полевые исследования (2014 г.) на пробных площадях (в насаждениях на молодых залежах площадь пробы составляла 20×20 м, в лесах – 33×33 м) осуществлялись общепринятыми в лесоводстве и почвоведении методами. Учету и описанию подлежали такие компоненты биогеоценоза, как древостой, подрост, подлесок, живой напочвенный покров, лесная подстилка, почва в толще старопахотного горизонта. Образцы лесной подстилки отбирали посредством деревянной рамки, почвы из толщи пахотного горизонта – металлическими кольцами в 5–10-кратной повторности. Фитомассу напочвенного покрова определяли укосным методом, закладывая 5–10 площадок размером 50×50 см, с пересчетом на воздушно-сухую массу на 1 га. В лабораторных условиях содержание органического углерода определяли методом Тюрина, плотность сложения лесной подстилки и почвы – термовесовым методом. Рассчитывали запас лесной подстилки на 1 га. Детрит (валеж, остолопы) в насаждениях отсутствовал и учету не подлежал.

Таблица 1

**Свойства пахотного горизонта почв и лесной подстилки в фитоценозах,  
формирующихся на залежах разного возраста**

Возраст залежи, лет	Лесная подстилка		Почва			
	Мощность, см	Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	Мощность пахотного горизонта, см	pH <sub>сол</sub>	C <sub>орг</sub> , %	Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>
16	Нет	Нет	30	7,3	1,23	$\frac{1,60 \pm 0,02}{1,55 \dots 1,66}$
25	Нет	Нет	30	7,2	1,76	$\frac{1,51 \pm 0,01}{1,47 \dots 1,56}$
63	$\frac{1,3 \pm 0,12}{1,0 \dots 1,5}$	$\frac{0,14 \pm 0,03}{0,07 \dots 0,22}$	21	7,4	1,36	$\frac{0,99 \pm 0,07}{0,66 \dots 1,01}$
130	$\frac{1,3 \pm 0,20}{1,0 \dots 2,0}$	$\frac{0,10 \pm 0,01}{0,070 \dots 0,13}$	22	7,2	1,01	$\frac{0,90 \pm 0,04}{1,00 \dots 1,21}$

Примечание: В числителе – среднее значение показателя и его стандартная ошибка, в знаменателе – минимальные и максимальные значения признака.

Запасы органического углерода (C<sub>орг</sub>) определяли в слое почвы 0...20 см, так как мощность пахотного горизонта на севере, особенно на старых пашнях, редко превышала это значение, с учетом плотности сложения по общепринятой в почвоведении методике [18]. Запасы углерода в лесной подстилке оценивали по методике [17], среднее значение содержания углерода в органическом веществе подстилок принимали равным 38 %, на основании расчетов Д.Г. Щепаченко с соавт. [19], для всех почв и растительных ассоциаций. Запас углерода в растениях живого напочвенного покрова рассчитывали через фитомассу надземной части, определенной в поле, принимая массу корней равной массе надземной части [23], содержание углерода – 40 % [13]. Для несомкнутых лесных насаждений запас углерода древесных пород вычисляли по уравнениям в соответствии с методикой [10]. Запасы фитомассы древостоя, подроста и подлеска рассчитывали по аллометрическим уравнениям на основе их численности и параметров роста по породам [16]. Для перерасчета фитомассы древостоя в углерод использовали конверсионный коэффициент: 0,50 – для древесины; 0,45 – для хвои [6].

*Результаты исследования и их обсуждение*

В процессе сукцессии с увеличением возраста насаждения на залежи происходит перераспределение количества углерода между компонентами биогеоценоза. Развитие живого напочвенного покрова при зарастании залежи травянистой растительностью способствует увеличению количества углерода в почве. Затенение поверхности земли разрастающимся пологом деревьев и кустарников ведет к смене луговой растительности кустарничковой, формированию древостоя с подростом и подлеском, что в свою очередь снижает количество углерода в пахотном горизонте почв.

Наибольший запас углерода (табл. 2) в пахотном горизонте почвы характерен для насаждений на молодых залежах (16–25 лет отчуждения). В этот период идет

разрастание луговых видов, что подтверждается высокими запасами фитомассы трав и оказывает влияние на содержание органического углерода в пахотном горизонте почвы. Запасы углерода в почве поддерживаются эффективным плодородием, сформированным внесением удобрений и мелиорантов в период активного сельскохозяйственного пользования, в том числе и при длительном (10 лет) использовании поля в качестве пастбища, как это было выявлено на залежи 25-летнего возраста. Дополнительное удобрение почв и частичное стравливание надземной части стимулировали повышенное разрастание напочвенного покрова злаковой ассоциации.

По мере развития фитоценоза запас углерода в пахотном горизонте почв уменьшается почти в 2 раза. Это обусловлено зарастанием залежей древесной растительностью, масса опада которой намного меньше массы органического вещества, поступающего в почву от травостоя, тогда как расход питательных веществ почвы древесными породами древостоя, подроста и подлеска увеличивается. Меняется и качество опада – легкоразлагаемый опад травянистых растений с высокой зольностью заменяется трудноразлагаемым опадом мхов и кустарничков [12].

Таблица 2

**Запас углерода (т/га) по отдельным компонентам биогеоценозов, формирующихся на залежах разного возраста**

Возраст залежи, лет	Почва (0...20 см)	Лесная подстилка	Живой напочвенный покров	Подрост (молодняк)	Подлесок	Древостой	Итого	Соотношение (в целых долях)	
								П+ЛП:ФМ	П:ЛП:ЖНП
16	39,4	–	4,1	0,10	0,30	–	43,9	9:1	9:0:1
25	52,8	–	8,1	0,01	0,03	–	60,9	9:1	9:0:1
63	25,2	6,5	1,4	0,30	0,04	76,5	110,0	1:3	8:2:0
130	18,2	4,8	0,5	0,02	0,06	215,6	239,2	1:10	8:2:0

Примечание: П – запас почвенного углерода; ЛП – запас углерода в лесной подстилке; ФМ – суммарный запас углерода в фитомассе растительности; ЖНП – запас углерода в фитомассе живого напочвенного покрова.

Наименьший запас углерода в пахотном слое почвы отмечается в насаждении на залежи возрастом 130 лет, на которой сформировался спелый листовенный лес. Запас углерода в толще старопахотного горизонта в 2–3 раза меньше, чем в пахотном горизонте почвы на молодых залежах, что связано со снижением его содержания до 1 %.

Лесная подстилка формируется на залежах спустя 40 лет после отчуждения, при зарастании древесными и кустарниковыми растениями. Именно к этому времени в условиях исследования разрастается древесный ярус и формируется лесная обстановка [4]. Однако из-за сохранения в напочвенном покрове формирующихся лесов значительной доли трав с легкоразлагающимся опадом мощность лесной подстилки невелика (1...2 см). Причем в нашем случае с увеличением возраста насаждения запас углерода в лесной подстилке уменьшается в 1,5 раза, что связано, скорее всего, с затенением растений нижних ярусов биогеоценоза разрастающимися кронами древесного яруса, изменением видового разнообразия живого напочвенного покрова и снижением его массы на единицу площади почти в 3 раза.

Более высокие запасы углерода в живом напочвенном покрове накапливаются в насаждениях на молодых залежах, пока не сформировался древостой и нет затенения кроной поверхности почвы, на стадии лугового фитоценоза. На залежах по мере развития растительности в динамике запаса углерода в живом напочвенном покрове отмечается резкий спад. Луговая растительность заменяется лесной, доля объемных трав снижается, увеличивается представленность кустарничков и лесного разнотравья. Запасы углерода растений живого напочвенного покрова необлесившихся залежей в 6,9 раз больше, чем на залежах старшего возраста. В отдельных случаях (возраст насаждения на залежах 25 и 130 лет) наблюдаются различия в 17 раз.

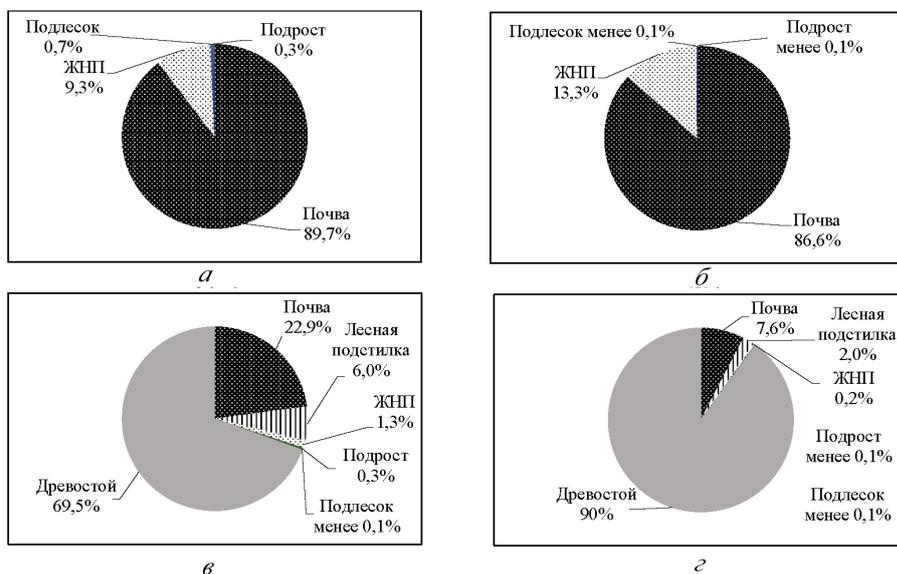
На залежах до 40 лет, пока не сформировался лесной полог древостоя, в расчет запасов углерода древесного яруса принимали подрост сосны, ели, лиственницы, березы как лесообразующих пород и все виды кустарничков, которые в дальнейшем формируют подлесок. В исследованных фитоценозах старшего возраста, где сформировался древостой, выделяли ярусы подроста и подлеска по лесоводственным критериям. Для подроста и подлеска в сформированных лесах на залежах характерны самые низкие показатели запаса углерода, по сравнению с другими компонентами биогеоценоза. Их доля не превышает 1 % и не имеет определяющего значения в структуре запасов углерода насаждения. Малый запас углерода в древесных и кустарниковых растениях на молодых залежах связан с их численностью, определяемой характером промежуточного пользования – сенокошением или пастьбой. Использование полей под пастбище и сенокошение задерживает естественное зарастивание [4]. Так, промежуточное пользование в течение 10 лет на поле 25-летнего отчуждения значительно снизило разрастание древесных растений.

Сформированный на залежах древостой, среди всех изученных компонентов биогеоценоза, характеризуется наибольшими запасами углерода. Несомненно, что увеличение запасов углерода в древостое связано с его возрастом и таксационными параметрами, определяющими продуктивность деревьев, что хорошо заметно при сравнении показателей сосняка на 63-летней и лиственничника на 130-летней залежах.

С возрастом наблюдается общая тенденция к суммарному (все компоненты биогеоценоза) увеличению запасов углерода в 2,3 раза: с 43,9 т/га на 16-летней залежи, покрытой луговой растительностью, до 239,2 т/га на 130-летней залежи, на которой сформировался лиственничный лес. Эта оценка соответствует данным [11, 17]. Однако согласно [9], секвестирование углерода будет продолжаться до климатического состояния насаждений и может достигнуть запасов 350 т/га.

В процессе сукцессии изменяется структура общих запасов углерода (см. рисунок).

В насаждениях на молодых залежах более 86 % запаса углерода представлено углеродом пахотного горизонта почвы. С увеличением возраста насаждений в ходе зарастания залежи лесом доля этого пула уменьшается и уже в средневозрастном 63-летнем сосновом насаждении составляет 22 %, а в спелом 130-летнем – всего 7,6 %. В необлесившихся фитоценозах на залежах существенна доля углерода живого напочвенного покрова в структуре общего запаса – 9...13 %. В насаждениях на залежах старшего возраста доля этого пула уменьшается до 1 %.



■ – почва ||||| – лесная подстилка ▨ – ЖНП ▩ – подрост ■ – подлесок ■ – древесной

Структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах средней подзоны тайги в ходе естественного зарастания залежей разного возраста: *a* – 16 лет; *б* – 25 лет; *в* – 63 года; *г* – 160 лет

Structure of carbon stocks in post-agrogenic ecosystems of the middle taiga subzone during natural overgrowth of fallows of different age, yrs: *a* – 16; *б* – 25; *в* – 63; *г* – 160

Перераспределение углерода в биогеоценозе происходит прежде всего за счет наиболее плодородного пахотного слоя почвы и поселившейся на залежи древесной растительности. Это два крупных пула углерода, поддерживающие перераспределение его в экосистеме. Уже к 63-летнему возрасту в средневозрастном насаждении на залежи в структуре общего запаса углерода преобладает доля древесной, которая достигает 70 %, 130-летний лиственный лес накапливает в древесное 90 % углерода. В необлесившихся залежах структура главных компонентов биогеоценоза (почвенный углерод, углерод напочвенного покрова и древесного яруса) составляет 9:1:0, тогда как в насаждениях на залежах 63- и 130-летнего возраста – 2:0:8 и 1:0:9 соответственно.

Подрост под пологом древесной и подлесок, который формируется за счет поселившихся на залежи видов кустарников, не имеют существенного значения в структуре углеродного пула. Их доля будет зависеть прежде всего от численности, которая регулируется длительностью и видом промежуточного пользования.

Начинающееся в формирующихся лесах образование лесной подстилки «оттягивает» на себя запасы углерода, накапливающиеся в живом напочвенном покрове. Этому способствуют изменение видового разнообразия растительности, снижение ее фитомассы на единицу площади, преобладание форм грубого (детритного) гумуса [3]. Лесная подстилка, накапливающая мортмассу, составляет в общем пуле углерода биогеоценоза 3...4 % и не способствует увеличению

запасов углерода в почве. В системе «почва – лесная подстилка – живой напочвенный покров» доля углерода пахотного слоя почвы снижается с возрастом залежеобразования от 91 до 76...77 %, а доля формирующейся подстилки в средневозрастном и спелом лесу составляет 16...20 %. При этом запас углерода напочвенного покрова с возрастом насаждений на залежах уменьшается с 9 до 2 %. Таким образом, в насаждениях на молодых залежах соотношение этих компонентов биогеоценоза составляет 9:0:1, тогда как в старых – 8:2:0. Лесная подстилка в формирующихся лесных насаждениях наиболее изменчива при сукцессионных изменениях в лесной зоне и вносит весомый вклад в структуру углерода биогеоценоза, что отмечалось ранее [1, 2]. Накопление углерода в лесной подстилке не зависит от свойств минеральной части почвы [32].

### Заключение

Установлено, что при самозаращении пашен лесом в условиях средней подзоны тайги на остаточно-карбонатных почвах (северных рендзинах) происходит закономерное перераспределение пула углерода от почвенного компонента биогеоценоза в сторону формирующегося древостоя с многолетней растительностью. Резкого снижения запасов органического углерода в пахотном горизонте почвы за 100-летний период не происходит в силу нейтрализации кислотности карбонатами и сохранения в напочвенном покрове травянистой растительности с легкоразлагаемым опадом. Это обуславливает медленное формирование толщи лесной подстилки, однако доля ее участия достигает 3...6 % от общего запаса углерода в насаждении, что выше пула растительности напочвенного покрова. В системе «почва – лесная подстилка – живой напочвенный покров» доля подстилки составляет 20 % от комплексного запаса, а ее формирование не влияет на процессы накопления углерода в пахотном горизонте почвы, запас углерода в которой с возрастом залежи закономерно снижается.

Оставление пахотных земель под самозаращение лесом и формирование на них лесных насаждений на плодородных остаточно-карбонатных почвах средней тайги приводит к постепенному снижению углеродного пула в почве, но будет способствовать секвенированию углерода в фитомассе растительности, прежде всего многолетней древесной, а также в лесной подстилке. Эти два крупных компонента биогеоценоза будут служить в качестве депо секвенированного углерода, поддерживая биологический круговорот веществ в насаждении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. Н.В. Лукиной; ФГБУН, Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. 232 с. [*Carbon Accumulation in Forest Soils and Forest Succession Status*. Ed. by N.V. Lukina. Moscow, KMK Publ., 2018. 232 p.]

2. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с. [Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. *Dynamics of Carbon Organic Matter Content of Spruce Forests in Middle Taiga Growing on Automorphic Soils*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2014. 270 p.]

3. Гиниятуллин К.Г., Шинкарев А.А., Фазылова А.Г., Кузьмин К.И., Шинкарев А.А. (мл.) Пространственная неоднородность вторичной аккумуляции гумуса в старопахот-

ных горизонтах залежных светло-серых лесных почв // Учен. зап. Казан. гос. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2012. Т. 154, кн. 4. С. 61–70. [Giniyatullin K.G., Shinkarev A.A., Fazylova A.G., Kuzmina K.I., Shinkarev A.A. (Jr.) Spatial Heterogeneity of Secondary Humus-Accumulation in Old-Arable Horizons of Fallow Light-Grey Forest Soils. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki* [Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series], 2012, vol. 154, book 4, pp. 61–70].

4. Голубева Л.В., Наквасина Е.Н. Трансформация постагрогенных земель на карбонатных отложениях: моногр. Архангельск: Кира, 2017. 152 с. [Golubeva L.V., Nakvasina E.N. *Transformation of Postagrogenic Lands on Carbonate Sediments*. Arkhangelsk, Kira Publ., 2017. 152 p.].

5. Замолодчиков Д.Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. № 4(29). С. 15–22. [Zamolodchikov D.G. Systems for Estimating and Forecasting Carbon Stocks in Forest Ecosystems. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye*, 2011, no. 4(29), pp. 15–22].

6. Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Уткин А.И. Пулы и потоки углерода лесов Дальневосточного федерального округа // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. XXIII, № 3. С. 21–30. [Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Utkin A.I. Pools and Flows of Carbon in the Forests of the Far-Eastern Federal District. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal area], 2006, vol. 23, no. 3, pp. 21–30].

7. Иванов А.Л., Столбовой В.С. Инициатива «4-промилле» – новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почв. инст-та им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 185–202. [Ivanov A.L., Stolbovoy V.S. The Initiative “4 per mille” – a New Global Challenge for the Soils of Russia. *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva* [Dokuchaev Soil Bulletin], 2019, iss. 98, pp. 185–202]. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).

8. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мостовая А.С., Телеснина В.М. Влияние процессов естественного лесовосстановления на углеродный статус и микробиологическую активность постагрогенных почв в различных лесорастительных зонах европейской части России // Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения: материалы докл. VI Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Сыктывкар, 14–18 сент. 2015 г.). Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2015. С. 152–154. [Kurganova I.N., Lopes de Uerenu V.O., Mostovaya A.S., Telesnina V.M. Influence of Natural Reforestation Processes on Carbon Status and Microbiological Activity of Postagrogenic Soils in Various Forest Growing Zones of the European Part of Russia. *Fundamental and Applied Aspects of Forest Soil Science: Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference on Forest Soil Science with International Participation (Syktyvkar, Russia, September 14–18, 2015)*. Syktyvkar, Komi Science Centre UB RAS, 2015, pp. 152–154].

9. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Неведова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с. [Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dynamics of Agricultural Lands of Russia in the 20th Century and Postagrogenic Restoration of Soils and Vegetation*. Moscow, GEOS Publ., 2010. 416 p.].

10. Методика информационно-аналитической оценки бюджета углерода лесных насаждений на локальном уровне // ЦЭПЛИ РАН.: Режим доступа: <http://old.cepl.rssi.ru/carbondoc/local/local1.doc> (дата обращения: 07.10.19). [Methodology of Information and Analytical Assessment of the Carbon Budget of Forest Plantations at the Local Level. CEPF RAS].

11. 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. [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* [Russian Journal of Forest Science], 2015, no. 4, pp. 307–317].

12. Телеснина В.М., Владыченский А.С. Особенности биологического круговорота в постагрогенных экосистемах южной тайги // Экологические функции лесных почв в естественных и нарушенных ландшафтах: памяти В.В. Никонова: материалы докл. IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Апатиты, 12–16 сент. 2011 г.). Апатиты: Кольский НЦ, 2011. Ч. 1. С. 130–134. [Telesnina V.M., Vladychenskiy A.S. Features of Biological Cycle in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga. *Ecological Functions of Forest Soils in Natural and Damaged Landscapes: Proceedings of the 4th All-Russian Scientific Conference with International Participation in memory of V.V. Nikonov (Apatity, September 12–16, 2011)*. Apatity, KSC, 2011, part 1, pp. 130–134].

13. Тутлянова А.А. Биологический круговорот углерода в травянистых биогеоценозах. Новосибирск: Наука, 1977. 219 с. [Titlyanova A.A. *Biological Cycle of Carbon in Grass Biogeocenoses*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 219 p.]

14. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В. Пулы и потоки углерода в лесном фонде Архангельской области // Академическая наука и ее роль в развитии производительных сил в северных регионах России: материалы докл. Всерос. конф. с междунар. участием (г. Архангельск, 19–22 июня 2006 г.). Архангельск, 2006. С. 1–4. [Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V. Pools and Flows of Carbon in the Forests of the Arkhangelsk Region. *Academic Science and Its Role in the Development of Productive Forces in the Northern Regions of Russia: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation*. Arkhangelsk, 2006, pp. 1–4].

15. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Курц В.А. Влияние объемов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS3 // Тр. СПбНИИЛХ. 2014. № 1. С. 5–18. [Zamolodchikov D.G., Grabowsky V.I., Kurz W.A. Influence of Forest Harvest Rates on the Carbon Balance of Russian Forests: Projective Analysis Using the CBM-CFS3 Model. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute], 2014, no. 1, pp. 5–18].

16. Уткин А.И., Замолодчиков 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. [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* [Russian Journal of Forest Science], 1996, no. 6, pp. 36–46].

17. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Изменение величины и структуры запасов углерода в регионах южной тайги и лесостепи Европейской России за исторический период // Живые и биокосные системы. 2017. № 19. Режим доступа: <http://www.jbks.ru/archive/issue-19/article-2> (дата обращения: 01.04.19). [Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Changes of Organic Carbon Pools in the Southern Taiga and Forest-Steppe of European Russia during the Historical Period. *Zhivyye i biokosnyye sistemy*, 2017, no. 19].

18. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42. [Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. Reserves of Biological Carbon and Nitrogen in Soils of Russian Forest Fund. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2004, no. 4, pp. 30–42].

19. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.В. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. [Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F. The Pool of Organic

Carbon in the Soils of Russia. *Pochvovedeniye* [Eurasian Soil Science], 2013, no. 2, pp. 123–132]. DOI: [10.7868/S0032180X13020123](https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123)

20. Яшин И.М., Кашанский А.Д. Ландшафтно-геохимическая диагностика и генезис почв Европейского Севера России: моногр. М.: РГАУ –МСХА им. К.А. Тимирязева, 2015. 202 с. [Yashin I.M., Kashanskiy A.D. *Landscape-Geochemical Diagnostics and Genesis of Soils of the European North of Russia*: Monograph. Moscow, RSAU – МТАА Publ., 2015. 202 p.].

21. Chang R., Jin T., Lü Y., Liu G., Fu B. Soil Carbon and Nitrogen Changes Following Afforestation of Marginal Cropland across a Precipitation Gradient in Loess Plateau of China. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, iss. 1, art. e85426. DOI: [10.1371/journal.pone.0085426](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085426)

22. Cukor J., Vacek Z., Linda R., Bílek L. Carbon Sequestration in Soil Following Afforestation of Former Agricultural Land in the Czech Republic. *Central European Forestry Journal*, 2017, vol. 63, iss. 2-3, pp. 97–109. DOI: [10.1515/forj-2017-0011](https://doi.org/10.1515/forj-2017-0011)

23. Enquist B.J., Niklas K.J. Global Allocation Rules for Patterns of Biomass Partitioning in Seed Plants. *Science*, 2002, vol. 295, iss. 5559, pp. 1517–1520. DOI: [10.1126/science.1066360](https://doi.org/10.1126/science.1066360)

24. Gao Y., Tian J., Pang Y., Liu J. Soil Inorganic Carbon Sequestration Following Afforestation Is Probably Induced by Pedogenic Carbonate Formation in Northwest China. *Frontiers in Plant Science*. 2017, vol. 8, art. 1282. DOI: [10.3389/fpls.2017.01282](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01282)

25. Holubík O., Podrázský V., Vopravil J., Khel T., Remeš J. Effect of Agricultural Lands Afforestation and Tree Species Composition on the Soil Reaction, Total Organic Carbon and Nitrogen Content in the Uppermost Mineral Soil Profile. *Soil & Water Research*, 2014, vol. 9(4), pp. 192–200. DOI: [10.17221/104/2013-SWR](https://doi.org/10.17221/104/2013-SWR)

26. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Dynamics of Carbon Pools in Post-Agrogenic Sandy Soils of Southern Taiga of Russia. *Carbon Balance and Management*, 2010, vol. 5, art. 1. DOI: [10.1186/1750-0680-5-1](https://doi.org/10.1186/1750-0680-5-1)

27. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Najdenko L., Giani L. Self-Restoration of Post-Agrogenic Sandy Soils in the Southern Taiga of Russia: Soil Development, Nutrient Status, and Carbon Dynamics. *Geoderma*, 2009, vol. 152, iss. 1-2, pp. 35–42. DOI: [10.1016/j.geoderma.2009.05.014](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.014)

28. Kazlauskaitė-Jadzevičienė A., Tripolskaja L., Volungevičius J., Bakšienė E. Impact of Land Use Change on Organic Carbon Sequestration in Arenosol. *Agricultural and Food Science*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 9–17. DOI: [10.23986/afsci.69641](https://doi.org/10.23986/afsci.69641)

29. Li D., Niu S., Luo Y. Global Patterns of the Dynamics of Soil Carbon and Nitrogen Stocks Following Afforestation: A Meta-Analysis. *New Phytologist*, 2012, vol. 195, iss. 1, pp. 172–181. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04150.x)

30. Paul K.I., Polglase P.J., Nyakuengama J.G., Khanna P.K. Change in Soil Carbon Following Afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 168, iss. 1-3, pp. 241–257. DOI: [10.1016/S0378-1127\(01\)00740-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00740-X)

31. Robyn L. Soil Carbon Accumulation during Temperate Forest Succession on Abandoned Low Productivity Agricultural Lands. *Ecosystems*, 2010, vol. 13, no. 6, pp. 795–812.

32. Vesterdal L., Rosenqvist L., Van Der Salm C., Hansen K., Groenenberg B.-J., Johansson M.-B. Carbon Sequestration in Soil and Biomass Following Afforestation: Experiences from Oak and Norway Spruce Chronosequences in Denmark, Sweden and the Netherlands. *Environmental Effects of Afforestation in North-Western Europe*. Ed. by G.W. Heil, B. Muys, K. Hansen. Dordrecht, Springer, 2007, pp. 19–51. DOI: [10.1007/1-4020-4568-9\\_2](https://doi.org/10.1007/1-4020-4568-9_2)

33. Xiang Y., Cheng M., Huang Y., An S., Darboux F. Changes in Soil Microbial Community and Its Effect on Carbon Sequestration Following Afforestation on the Loess Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, vol. 14, iss. 8, art. 948. DOI: [10.3390/ijerph14080948](https://doi.org/10.3390/ijerph14080948)

34. Zhiyanski M., Glushkova M., Ferezliev A., Menichetti L., Leifeld J. Carbon Storage and Soil Property Changes Following Afforestation in Mountain Ecosystems of the Western Rhodopes, Bulgaria. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2016, vol. 9, iss. 4, pp. 626–634. DOI: [10.3832/ifer1866-008](https://doi.org/10.3832/ifer1866-008)

## DYNAMICS OF CARBON STOCKS IN THE FORMATION OF FORESTS ON POST-AGROGENIC LANDS

*Elena N. Nakvasina*<sup>1</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

*Yuliya N. Shumilova*<sup>2</sup>, Candidate of Geography, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABH-6497-2020](https://orcid.org/0000-0002-6736-0268),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6736-0268>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: [e.nakvasina@narfu.ru](mailto:e.nakvasina@narfu.ru)

<sup>2</sup>Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: [j.shumilova@sevniilh-arh.ru](mailto:j.shumilova@sevniilh-arh.ru)

**Abstract.** Carbon stocks were calculated in different components of biogeocenosis (soil, living ground cover, forest floor, undergrowth, underbrush and forest stand) using the example of a selected chronosequence of fallows (4 sample areas of different age, yrs: 16, 25, 63 and 130) in the Kargopol district of the Arkhangelsk region (middle taiga subzone, residual carbonate soils). The structure of carbon stocks of the forming plantations and its changes with the fallow age is estimated. It was found that a natural increase in carbon stocks and its redistribution between the soil and the forming phytocenosis occurs in the process of succession during the afforestation of arable lands. In plantations growing on young fallows, more than 86 % of the carbon stock is represented by carbon from the arable soil horizon. During the colonization of the fallow by forest vegetation the share of this pool decreases and already in the middle-aged 63-year-old forest it is 22 %, and in the mature 130-year-old forest it is only 7.6 %. In the structure of the total carbon stock in the middle-aged plantation, the share of the stand reaches 69 %, and in the mature 130-year-old stand it is already 90 %. In plantations on young fallows, the structure of the main components of biogeocenosis (soil carbon, ground cover carbon and tree layer carbon) is characterized by a ratio of 9:1:0, whereas in plantations on old fallows of 63 and 130 years it is 2:0:8 and 1:0:9, respectively. The undergrowth and underbrush of the studied chronosequence are characterized by the small shares of carbon, which do not have a significant value in the structure of the ecosystem carbon pool. Forest floor in forming forest stands contributes significantly to the carbon structure of the biogeocenosis, although the total biogeocenosis carbon pool is 3–4 % and does not contribute to an increase in soil carbon stocks. In the system “soil – forest floor – living ground cover” the share of soil carbon decreases from 91 to 76–77 % with the increase in the age of plantation, while the share of formed forest floor in the middle-aged and mature forest is 16 and 20 %, respectively. In plantations on young fallows the ratio of these components of biogeocenosis is 9:0:1, whereas on old fallows it is 8:2:0. Leaving arable land on residual carbonate soils for self-overgrowth with forest vegetation and formation of forest plantations on them in the middle taiga subzone will lead to a gradual decrease in the carbon pool in the soil, but will contribute to the sequencing of carbon in the phytomass of perennial woody vegetation and in forest floor. These two components of biogeocenosis will serve as a sequenced carbon depot, supporting the biological cycle.

---

**For citation:** Nakvasina E.N., Shumilova Yu.N. Dynamics of Carbon Stocks in the Formation of Forests on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 1, pp. 46–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-46-59

**Acknowledgements:** The research was partially supported by RFBR and the Government of the Arkhangelsk region, grant No. 17-44-290111 and is based on descriptions of the sample areas included in the database of the Department of Forestry and Forest Management of NArFU.

**Keywords:** fallows, post-agrogenic forests, chronosequence, carbon stocks, biogeocenosis components, soil, stand, forest floor.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов*

*The authors declare that there is no conflict of interest*

Поступила 12.11.19 / Received on November 12, 2019

---