

БАЛАНС УГЛЕРОДА НА ПОСТАГРОГЕННЫХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ

© 2023 г. А. В. Дмитриев^{a,b,*}, А. В. Леднёв^{a,c,**}

^aУдмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

^bУдмуртский государственный аграрный университет, Ижевск, Россия

^cУдмуртский научно-исследовательский институт сельского хозяйства,
с. Первомайский, Завьяловский район, Россия

*E-mail: lexusD1976@mail.ru

**E-mail: av-lednev@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.01.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 22.04.2023 г.

В статье анализируется изменение показателей депонирования углерода и его высвобождения в атмосферу на дерново-подзолистых почвах в зависимости от типа угодий и элементов рельефа. В качестве основного объекта исследований выбраны разновозрастные залежи. Они сравнивались с расположенными поблизости пахотными и лесными угодьями. Установлено, что максимальные объёмы ежегодного связывания и выделения углерода отмечаются в лесных угодьях, залегающих на аккумулятивных звеньях катены (5.7 и 5.41 тС/га соответственно), минимальные — на пашне на транзитных звеньях (1.23 и 1.47 тС/га соответственно). Количество связанного углерода на залежах обусловлено периодом их зарастания и месторасположением: для залежей с периодом зарастания до 20 лет — 1.84–3.49 тС/га, более 20 лет — 3.02–3.65 тС/га. Наибольшие показатели депонирования и высвобождения углерода наблюдались на аккумулятивных звеньях катены, что объясняется лучшими условиями увлажнения этих участков, особенно в засушливые периоды.

Расчёт годового баланса углерода на ключевых площадках показал отрицательный тренд его накопления на пашне, а также на залежах с периодом зарастания до 20 лет. Наибольший положительный баланс фиксировался под лесами, что подтверждает их ведущую роль в связывании углекислого газа атмосферы.

Ключевые слова: залежь, период зарастания, звенья катены, баланс углерода, дерново-подзолистые почвы.

DOI: 10.31857/S0869587323050031, EDN: VVTJHD



ДМИТРИЕВ Алексей Валентинович — кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник УдмФИЦ УрО РАН, доцент УдГАУ. ЛЕДНЁВ Андрей Викторович — доктор сельскохозяйственных наук, руководитель УдмНИИСХ.

На протяжении многих лет активно обсуждаются доказательства глобального изменения климата и его негативное влияние на окружающую среду [1–3]. Выяснение причин резкого потепления и поиск путей его замедления — одни из ведущих направлений научных исследований в России и мире, актуальность которых со временем только возрастает [1]. Среднегодовая температура воздуха у поверхности земли на территории нашей страны с середины 1970-х годов растёт в среднем на 0.47°C за 10 лет, что в 2.5 раза превышает темпы роста средней глобальной температуры воздуха (0.18°C за 10 лет) [4]. Повышение концентрации углекислого газа (как одного из основных парниковых газов) в атмосфере служит главным фактором, влияющим на изменение климата. Глобальные концентрации CO₂ отража-

ют баланс между выбросами газов в результате природных процессов и хозяйственной деятельности человека и их поглощением биосферой, включая Мировой океан.

В этом контексте стоит упомянуть государственные документы, затрагивающие тему изменений климата в России: “Климатическая доктрина Российской Федерации на период до 2030 г.” [5], “Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации до 2030 г.” [6], предусматривающая мероприятия по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу, и “Национальный план мероприятий адаптации к изменениям климата на период до 2022 года” [4].

Суммарный годовой поток CO_2 из почв наземных экосистем планеты оценивается в 50–77 ГтС/год [7], из которых 11–17% углерода поступает в атмосферу из-за хозяйственной деятельности человека, в том числе при распашке залежей и целинных земель – 2.2 ГтС/год. Отмечено, что в России эмиссия CO_2 из почвы по меньшей мере в 8 раз превосходит эмиссию из промышленных источников [8, 9].

Изменение характера использования угодий может сказываться на содержании органического углерода в почве [10, 11]. Поэтому даже небольшие вариации почвенных потоков CO_2 , связанные со сменой системы землепользования или климатическими аномалиями, могут оказывать значительное влияние на атмосферную концентрацию диоксида углерода [12, 13]. Ряд исследователей отмечают активное накопление углерода в фитомассе древесной растительности в результате процесса лесовосстановления на бывших сельскохозяйственных землях [14–16]. Если динамика CO_2 почвы лесных и пахотных угодий достаточно стабильна по годам, то процессы зарастания сельскохозяйственных площадей (сначала травянистой, а затем древесно-кустарниковой растительностью) и обратное их вовлечение в интенсивный сельскохозяйственный оборот приводят к существенной изменчивости показателей, что требует изучения.

Известно, что природные биологические факторы играют огромную роль в формировании баланса углерода в окружающей среде. На суше к ним относятся растительность, микроорганизмы, почвенная и надпочвенная фауна. Именно их жизнедеятельность поддерживает стабильный химический состав атмосферы, в первую очередь содержание кислорода и углекислого газа. Так как численность фауны и почвенных микроорганизмов из года в год существенно не изменяется, то связывание углерода и его высвобождение в виде углекислого газа в атмосферу практически равны. Отсюда следует, что из всех природных факторов только растительность может смещать планетарный баланс углерода в ту или иную сторону.

Первичная продукция, создаваемая зелёными растениями в результате фотосинтеза, определяет биологический потенциал территории, а трансформация поступающего мёртвого органического вещества в почве – природный баланс углерода. Таким образом, от вида и продуктивности растений, с одной стороны, и интенсивности процессов минерализации и гумификации мёртвого органического вещества, с другой, зависят количество связанного из углекислого газа органического углерода и его обратное высвобождение в атмосферу. В России площадь покрытых лесной растительностью земель составляет 795 млн га (46.4% территории страны) [17]; эти земли выступают основным накопителем углерода. Кроме лесов, большую роль в потреблении CO_2 играют сельскохозяйственные земли (пашни, кормовые угодья и залежи). Каждый тип земель по-своему участвует в изменении баланса углерода в окружающей среде.

Характерная особенность лесных угодий – ежегодное связывание углекислого газа в процессе фотосинтеза, которое характеризуется приростом древесно-кустарниковой растительности (сумма приростов спелого и прироста подроста и подлеска) и биомассой травянистого покрова. Расход углерода в лесу зависит от скорости минерализации и гумификации опада древесно-кустарниковой растительности (листьев и хвои) и травяной биомассы.

Баланс углерода на пашне складывается из объёма углерода, связанного биомассой только травянистых растений и равного общей продуктивности сельскохозяйственных культур и сорняков (надземных и подземных органов), и его обратного высвобождения в результате минерализации и гумификации этой биомассы.

Баланс углерода на залежных землях наиболее сложный. На его параметры влияют ландшафтные условия, смена ботанического состава и степень залесения постагрогенной почвы древесно-кустарниковой растительностью, которая, в свою очередь, зависит от периода зарастания. Именно поэтому залежные земли выбраны нами в качестве основного объекта исследований.

В настоящее время проведён большой объём работы по изучению влияния различных природных и антропогенных факторов на характер и скорость смены травянистых и древесно-кустарниковых ассоциаций в зависимости от природных условий и типа использования постагрогенных почв, установлены стадии их зарастания [18–23]. Влияние изменения типа использования земель на запасы углерода и его фракционный состав в почвах широко обсуждался специалистами [13, 24–28]. Разработан комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России, позволяющий адапти-

ровать стратегии землепользования к условиям конкретных регионов [29]. Однако в этой области имеется целый ряд вопросов, недостаточно хорошо изученных в научной литературе или имеющих спорный характер. В частности, не отражено влияние на баланс углерода в системе “атмосфера → растения → почва → атмосфера” периода зарастания залежи, её месторасположения на элементах рельефа и гранулометрического состава почв.

Цель нашего исследования — установить влияние зарастания пашни травянистой, а затем древесно-кустарниковой растительностью на процессы связывания—высвобождения углекислого газа и определить их основные параметры.

Регион, растительность и почвы. Изучение влияния процесса зарастания пашни на баланс углерода в окружающей среде проводилось в Удмуртской Республике — Среднем Предуралье. Этот регион располагается в основном в подзоне южной тайги, а самая южная её часть — в подзоне северной лесостепи [30]. В структуре земельного фонда республики преобладают лесные угодья, на долю которых приходится 48.1% всей территории, и земли сельскохозяйственного назначения — 44.2%. Лесная растительность представлена смешанными травянистыми лесами, в северной части в древостое преобладают хвойные породы, а в центральной и южной частях — мелколиственные. После экономического кризиса 1990-х годов значительная часть сельскохозяйственных угодий постепенно заросла древесно-кустарниковой растительностью, и только после 2010 г. наметилась тенденция к их обратному превращению в пашню. С 1990 г. посевная площадь в Удмуртии сократилась на 483.4 тыс. га (–34.5%), пашни — на 202.6 тыс. га (–13%), большая часть этих земель перешла в категорию заброшенных [31]. Однако официальная площадь залежей по состоянию на 1 января 2021 г. — менее 0.02% (8.7 тыс. га) [32].

Климат Удмуртской Республики умеренно-континентальный с продолжительной холодной многоснежной зимой и довольно жарким коротким летом. Среднегодовое количество осадков снижается с севера на юг и составляет 650 и 400 мм соответственно, из них на холодное время приходится 30–35%, на тёплое — 65–70%. Испарение варьируется от 400 до 450 мм. Сумма активных температур выше 10°C¹ — 1700–2000, коэффициент увлажнения по Высоцкому–Иванову — 1.0–1.4. Рельеф представляет собой увалистую равнину с хорошо выраженной овражно-балочной се-

тью. Преобладающие почвообразующие породы — покровные глины и суглинки элювиально-делювиального и делювиально-солифлюкционного происхождения [20, 26].

Исследование современных почвообразовательных процессов, в том числе баланса углерода, проводилось на ключевых площадках, которые были выявлены в результате экспедиционного почвенно-экологического обследования территории Удмуртской Республики. Участок, объединявший площадки, располагался на одной почвенной разности² транзитного или аккумулятивного элемента рельефа³. На каждой площадке на достаточно близком расстоянии (не более 60–80 м) присутствовали три вида угодий (пашня, разновозрастная залежь, лес).

В данной статье приведены данные по 18 ключевым площадкам, расположенным на транзитных (10 площадок) и аккумулятивных (8 площадок) звеньях катен⁴, которые наиболее контрастно отражают современные процессы почвообразования, протекающие в подзоне южной тайги. Период зарастания залежных земель на площадках колебался от 5 до 80 лет. По изменению характера растительности площадки были разбиты на две группы: зарастание до 20 (разнотравно-злаковые и разнотравные ассоциации) и более 20 лет (разнотравные закустаренные и залесённые). В качестве контроля выбрана пашня (звено севооборота: ячмень с подсевом клевера, клевер 1 года пользования, клевер 2 года пользования, озимая рожь), на примере которой изучались свойства современных агрогенно-изменённых почв, абсолютного контроля — лес, отражавший свойства естественных природных почв. В соответствии с типологией, разработанной академиком В.Н. Сукачёвым (1951), лес транзитного звена катены представлен ельниками сложными (липовыми), аккумулятивного звена катены — ельниками травяными (папоротниковыми) и смешанными липово-берёзовыми лесами (приспевающими и спелыми).

Основной объект исследований — агродерново-подзолистые реградированные (возврат к

² Почвенная разность — неопределённый классификационный термин, используемый для обозначения любой почвы без указания её таксономического статуса.

³ Транзитный ландшафт — склоны различной крутизны, область самого интенсивного переноса веществ в растворимом и твёрдом состоянии. Внутрипочвенный и боковой сток приводят к значительному перераспределению веществ в профиле почвы и подстилающих её породах. Аккумулятивный ландшафт формируется на отрицательных (вогнутых) элементах рельефа.

⁴ Катена — последовательность почв вниз по склону, созданная под влиянием осадков, инфильтрации и стока. В пределах катены обычно можно выделить три звена, приуроченных к разным ярусам или ступеням рельефа: элювиально-делювиационное (верхнее), транзитное (промежуточное), аккумулятивное (нижнее).

¹ Сумма активных температур — показатель, характеризующий количество тепла и представляющий собой сумму средних суточных температур воздуха или почвы, превышающих определённый порог (0, 5, 10°C) или биологический минимум температуры, необходимой для развития конкретного растения.

предшествующей стадии почвообразования) почвы разного периода зарастания (Albic Glossic Retisols (Aric, Cutanic, Ochric)⁵) [7], расположенные на транзитных и аккумулятивных элементах ландшафта. Подробное описание ключевых площадок и характеристика их почвенного покрова приведены в работах [20, 33]. На залежных землях для выявления стадийности процесса зарастания рассматривалась степень наложения природных (зональных) процессов почвообразования на агрогенно-изменённые почвы в зависимости от времени воздействия сорной травяной и древесно-кустарниковой растительности.

Исследования проводили примерно в одно и то же время — в июле, в период максимального развития биомассы растений. На каждой площадке заложены по три почвенных полуразреза на глубину 100–110 см с подробным изучением их морфологических признаков. С целью определения агрохимических показателей отобраны почвенные образцы из генетических горизонтов, а из пахотного и постагрогенного горизонтов они отбирались в слоях 0–10 и 10–20 см. На ключевых участках вокруг каждого полуразреза заложена пробная площадка размером 10 × 10 м, на которой проведено полное описание видового состава сообществ с выделением доминантов числовым и весовым методом в период максимального развития травостоя (июль) и определена чистая первичная продукция [13]. На пашне доля корней зерновых принята за 10% [34].

В структуре органического вещества растительного покрова чистая первичная продукция рассчитана путём суммирования надземной (учёт сноповым методом) и подземной продукции по неполным данным с использованием формул на основании математического анализа значительного массива экспериментальных данных [35, 36].

Запас древесины и объём древесной зелени (хвоя, листья, почки, неодревесневшие побеги) на залежных и лесных участках определены по их геоботаническому описанию [35] и данным лесотаксационного справочника [37], запасы тонких корней деревьев — по работе [38].

Содержание органического вещества находили по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подготовку почвенной пробы проводили с использованием наэлектризованной стеклянной палочки. Количество депонированного биомассой растений углерода и гумификация мёртвого органического вещества рассчитаны с учётом содержания его в гумусе гуматно-фульватного типа — 42%, в травяном опаде с учётом видового состава — 45%, в древесном в зависимости от породного состава — 42–45%; коэффициент гу-

мификации растительного опада, образующегося за год, для лесных экосистем травяных растений — 5%, лесной растительности — 10% [39]. Запасы углерода каждого слоя профиля исследуемых почв определяли по формуле:

$$\text{ОВП} = C \cdot \rho_V \cdot h,$$

где ОВП — органическое вещество почвы, тС/га; C — абсолютное среднее содержание органического вещества в слое, %; ρ_V — плотность почвы, г/см³; h — мощность слоя, см.

Суммарные запасы органического вещества почвы в слое 0–100 см находили простым суммированием показателей в соответствующих слоях. Математическая обработка результатов исследований проведена с использованием прикладных программ Microsoft Excel. В таблицах и на графиках приведены средние значения и стандартная ошибка. Все статистические процедуры выполняли при уровне значимости P_{95} .

Органическое вещество почвы. Ежегодное поступление свежего органического вещества в почву, его количество и химический состав определяют процесс гумификации, то есть объём образующегося гумуса, его запасы и перераспределение по профилю почвы. На рисунке отражены выявленные закономерности перераспределения органического вещества в почвенном профиле ключевых площадок, расположенных на транзитных элементах катены. Видно, что наиболее значительные изменения в содержании и перераспределении органического вещества происходят после 20-летнего зарастания залежи, и они касаются в первую очередь постагрогенного горизонта. Наблюдается чёткая дифференциация первоначально однородного (гомогенного) пахотного слоя на два подгоризонта (подслоя). Это обусловлено тем, что в результате ежегодного поступления неотчуждаемого растительного опада на поверхность почвы и его гумификации увеличивается содержание гумуса в верхней части постагрогенного слоя, а в нижней части за счёт усиления зонального кислотного гидролиза — снижение. Стратификационное отношение содержания гумуса в верхней части (0–10 см) постагрогенного слоя залежных почв к его нижней части (10–20 см) в среднем по площадкам составило более 1.4, а в аналогичной почве, расположенной под пашней, — 1. Наиболее высокая степень дифференциации гумуса в верхней части профиля дерново-подзолистых почв наблюдалась в их целинных разновидностях под лесом (стратификационное отношение — 2.8), что свидетельствовало о наличии в почвах двух генетических горизонтов АУ (серо-гумусовый) и ЕL (элювиальный), значительно отличающихся по содержанию органического вещества. Более подробно эта закономерность описана в работе [40].

⁵ Дерново-подзолистая суглинистая с языками более лёгкого и светлого материала в более тяжёлом и тёмноокрашенном материале.

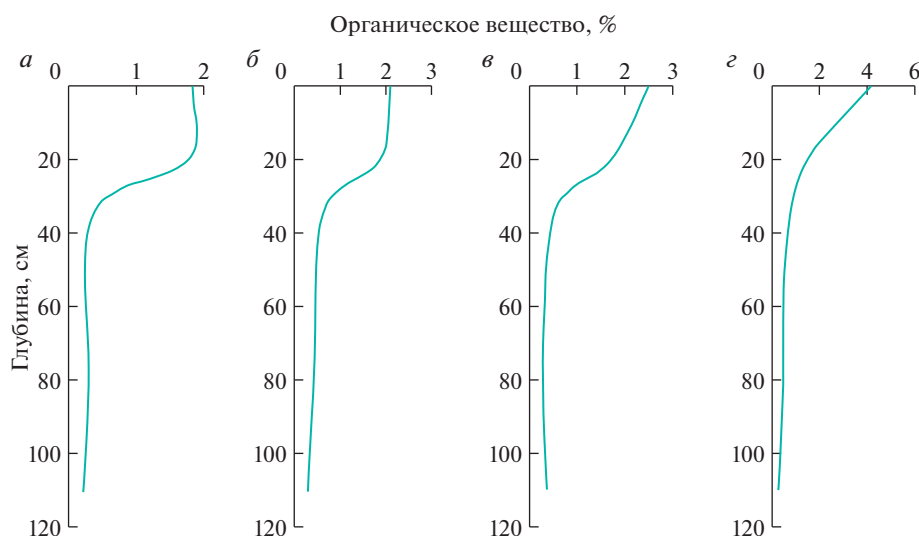


Рис. 1. Изменение содержания органического вещества по профилю дерново-подзолистых суглинистых почв, расположенных на транзитных звеньях катены (n – объём выборки)

a – пашня ($n = 14$); b – залежь до 10 лет ($n = 4$); v – залежь 10–20 лет ($n = 7$); z – лес ($n = 14$)

Содержание органического вещества в почвах лесных участков резко убывает вниз по профилю, указывая на классический гумусо-аккумулятивный характер распределения в метровом слое. Изменения содержания органического вещества по профилю почв ключевых площадок, расположенных на аккумулятивных звеньях катены, менее выражены, так как изначально почвы имели более мощный гумусовый горизонт и современный элювиальный процесс на этих элементах рельефа протекает с меньшей интенсивностью.

Параметры связывания углерода биомассой растений на разных типах угодий, звеньях катен и их зависимость от периода зарастания залежей приведены в таблице 1. Распределение влаги между элементами катен обусловило большую продуктивность почв ключевых площадок, расположенных на аккумулятивных звеньях. В результате содержание органического вещества в метровом слое почв на аккумулятивных звеньях в среднем было на 33.7 т/га выше (+37.9%), чем на транзитных. Необходимо отметить значительный

Таблица 1. Запас органического вещества почвы (слой 0–100 см, гумус, растительные и животные остатки разной степени разложения), т/га

Звено катены, угодье	n	$\bar{x} \pm \Delta x$	$\pm$ к контролю	s^2	s	V	t_{95}
Транзитное, пашня (контроль)	10	80.4 ± 20.9	–	897.1	30	37.3	2.2
Транзитное, залежь до 20 лет	10	86.6 ± 18.4	+6.2	694.8	26.4	30.4	2.2
Транзитное, залежь более 20 лет	4	85.5 ± 25	+5.1	246.5	15.7	18.4	3.2
Транзитное, лес	6	103.2 ± 14.3	+22.8	185.7	13.6	13.2	2.6
Среднее		88.9 ± 9.9				–	
Аккумулятивное, пашня (контроль)	8	104.2 ± 32.3	–	1534.4	39.2	37.6	2.3
Аккумулятивное, залежь до 20 лет	7	107.2 ± 45.5	+3	2466.5	49.7	46.3	2.4
Аккумулятивное, залежь более 20 лет	4	136.1 ± 23	+21.9	208.5	14.4	10.6	3.2
Аккумулятивное, лес	7	142.8 ± 19.5	+38.6	450.6	21.2	14.8	2.4
Среднее		122.6 ± 19.7				–	

Где n – объём выборки; $\bar{x} \pm \Delta x$ – среднее значение $\pm$ стандартное отклонение; s^2 – дисперсия; s – стандартное отклонение; V – коэффициент вариации; t_{95} – теоретическое значение критерия Стьюдента

разброс содержания органического вещества по ключевым площадкам, обусловленный разным уровнем их плодородия. Наименьшая вариативность данного показателя зафиксирована под лесом.

Изменение содержания органического вещества в дерново-подзолистых почвах (ОВП) в процессе зарастания пашни имеет свои особенности. В отличие от почв лугово-степной зоны [20, 33] их залесение приводит к увеличению органического вещества. Для пахотных участков отмечается существенное колебание суммарных запасов ОВП. В слое почвы 0–100 см ключевой площадки транзитного звена катены с периодом зарастания до 20 лет запас увеличился в среднем на 6.2 т/га (+7.7%) по сравнению с пашней. Дальнейшее зарастание (залежь более 20 лет) привело к снижению показателя на 1.1 т/га (+1.3%) по сравнению с предыдущим периодом, но он всё ещё превышал запас ОВП пахотных угодий на 5.1 т/га (+6.3%). В почвах площадок аккумулятивного звена с периодом зарастания до 20 лет запас органического вещества почвы увеличился в среднем на 3 т/га (+2.9%) по сравнению с пашней. Дальнейшее зарастание (залежь более 20 лет) повлекло значительное увеличение ОВП на 21.9 т/га (+21%) по сравнению с пашней.

Большой запас органического вещества почвы отмечен в лесных угодьях, особенно на аккумулятивных участках катен, где он на 39.6 т/га был выше, чем на транзитных. В почвах пахотных угодий и залежи (до 20 лет), как аккумулятивных, так и транзитных звеньев, наблюдалась сильная вариация запаса ОВП в слое 0–100 см, обусловленная разными уровнями плодородия полей севооборотов.

Разница содержания органического вещества почвы пашни и леса на ключевых площадках транзитных звеньев катен составила 22.8 т/га, аккумулятивных — 38.6 т/га. Положительный баланс запаса ОВП по мере вывода пашни из активного сельскохозяйственного оборота обусловлен усилением гумусообразования в верхней части гумусового слоя за счёт большего прихода мёртвого органического вещества, которое лишь частично снижалось в результате усиления зонального кислотного гидролиза в нижней части этого слоя.

Органическое вещество растений. В предыдущих исследованиях установлено, что в процессе зарастания пашни разнотравно-злаковые ассоциации постепенно сменяются типичным разнотравьем с преобладанием на более поздних этапах лесных видов, резким снижением (более чем в 2 раза) продуктивности травяной растительности с появлением древесной [41]. Увеличение биомассы растений определяется приростом древесно-кустарниковой растительности (сумма приро-

стов спелого и приспевающего древостоя, подроста и подлеска) и биомассой травяного покрова.

Рассчитанный ежегодный прирост подземной и надземной продукции растительности ключевых площадок аккумулятивного звена катены на 1.36 т/га (+23.6%) в пересчёте на абсолютно сухое вещество (а.с.в.) превышал продуктивность транзитной. Это произошло в основном за счёт массы древесной зелени, что, по всей видимости, обусловлено двумя причинами: лучшей обеспеченностью влагой пониженных элементов рельефа, особенно в засушливые годы и периоды, и преобладанием лиственных пород в составе древостоя.

На почвах ключевых площадок аккумулятивных звеньев наблюдалась наибольшая разница суммарного ежегодного прироста растительности с периодом зарастания до 20 лет (3.42 т/га а.с.в.), более 20 лет (1.41 т/га а.с.в.) и почвах лесных угодий (0.9 т/га а.с.в.) по сравнению с транзитными площадками. Таким образом, ежегодный прирост растительности аккумулятивных элементов рельефа превышает таковой у транзитных, особенно в период зарастания до 20 лет, далее разница сглаживается и практически приближается к фоновому значению леса.

Состав органического вещества растений (ОВР) представлен в таблице 2. При зарастании пашни древесно-кустарниковой растительностью запас ОВР увеличивается и достигает максимума под лесом. Рассчитанный запас контрольных площадок аккумулятивного звена катены на 5.45 т/га а.с.в. (+12.2%) превышал запас транзитных площадок за счёт увеличения массы древесной растительности на 4.25 т/га а.с.в. (+11.7%) и древесной зелени на 1.18 т/га а.с.в. (+24.8%). Наибольшее отношение ОВП к ОВР наблюдалось на ключевых площадках пахотных угодий; по мере зарастания древесно-кустарниковой растительностью оно сокращается и достигает минимума в естественных лесах. Вклад в биомассу травяной растительности с увеличением периода зарастания снижается, древесной — увеличивается.

Баланс углерода органического вещества. Для расчёта баланса гумуса почв определён положительный и отрицательный баланс углерода. Количество ежегодно связываемого растениями углерода найдено путём суммирования массы травяной растительности, древесной зелени и тонких корней деревьев. Установлено, что растительность, произрастающая на площадках аккумулятивного звена катены, в среднем накапливает на 0.68 тС/га больше, чем на транзитном. В результате в почвах аккумулятивного звена количество связанного углерода ОВП на 0.05 тС/га выше, чем на транзитном участке. На аккумулятивных звеньях сумма связанного углерода (ОВР+ОВП) в почвах на 0.72 тС/га выше, чем на транзитных.

Таблица 2. Количество органического вещества растений на ключевых площадках, т/га а.с.в.

Звено катены, угодье	Масса травяной раститель- ности	Масса древесной раститель- ности	Масса древесной зелени	Запасы тонких корней деревьев	Всего	ОВП/ ОВР
Транзитное, пашня (контроль)	2.61	нет	нет	нет	2.61	30.8
Транзитное, залежь до 20 лет	1.82	5.37	1.99	мало	9.18	9.4
Транзитное, залежь более 20 лет	1.35	22.04	4.61	мало	28	3.1
Транзитное, лес	1.2	118.24	7.67	1.75	128.86	0.8
Среднее	1.75 ± 0.63	36.41 ± 60.93	4.76 ± 2.84	1.75	44.67	2
Аккумулятивное, пашня (контроль)	2.3	нет	нет	нет	2.30	45.3
Аккумулятивное, залежь до 20 лет	2.04	4.35	5.19	мало	11.58	9.3
Аккумулятивное, залежь более 20 лет	1.42	24.43	4.27	1.68	31.8	4.3
Аккумулятивное, лес	1.37	133.87	8.35	1.8	145.39	1
Среднее	1.78 ± 0.46	40.66 ± 69.71	5.94 ± 2.14	1.74	50.12	2.4

Период зарастания также оказал влияние на количество связанного углерода. В залежи транзитного звена с периодом зарастания до 20 лет количество депонированного (аккумулятивного) углерода ОВР на 0.54 тС/га/год превышало показатель пашни, а в залежи более 20 лет — на 1.43 тС/га/год (+122.2%), но не достигло значительных лесных угодий — 2.59 тС/га/год. В почвах аккумулятивного звена наблюдались более значимые изменения: в среднем количество углерода ОВР увеличилось на 2.21 тС/га/год (+212.5%) в почвах с периодом зарастания до 20 лет, с зарастанием более 20 лет — на 2.28 тС/га/год (+219.2%) по сравнению с пашней. Большая доля в депонировании углерода принадлежит древесной растительности — до 80% всего углерода органического вещества растений.

Аналогичными, но менее выраженными, были изменения содержания связанного углерода органического вещества почвы. Суммарное количество связанного углерода (ОВР+ОВП) площадок аккумулятивного звена катены на 1.08 тС/га/год (+23.8%) выше, чем транзитного (табл. 3).

Появление древесной растительности на залежных землях определяет количество депонированного углерода как в составе ОВР, так и ОВП. Отрицательный баланс углерода складывается из минерализации органического вещества растений и гумуса и эмиссии CO₂ в атмосферу. Более высокие темпы накопления гумуса почвами аккумулятивного звена обусловили высвобождение ими углерода на 0.15 тС/га/год (+37.5%) больше, чем транзитными почвами (табл. 4). При минера-

лизации органического вещества растений аккумулятивного звена катены выделение углерода на 0.53 тС/га/год (+22.1%) превышает транзитное (ввиду большей продуктивности растений).

Наблюдается нарастание эмиссии углерода в результате разложения органического вещества с увеличением периода зарастания залежей, что вызвано сменой травяной растительности на древесную. Суммарное высвобождение углерода в атмосферу (ОВП+ОВР) в результате разложения органического вещества аккумулятивного звена катены на 0.69 тС/га/год больше (+24.5%), чем транзитного.

Таким образом, наиболее значимый источник ежегодного поступления углерода в атмосферу — минерализация растительного опада, на долю которого приходится 84.3–85.8% суммарного углерода органического вещества почвы и растений. Минерализация прямо пропорциональна продуктивности зарастающих земель (поступлению растительного опада в почву).

Расчёт баланса углерода показал его потери на пахотных и зарастающих (до 20 лет) землях. На залежах с периодом зарастания более 20 лет отмечен положительный баланс (аккумуляция) углерода, увеличивающийся по мере зарастания залежи, особенно после появления древесной растительности (табл. 5), которая изменяет составляющие поглощения и выделения углерода в виде CO₂. В результате дополнительно связывается 0.32–0.56 тCO₂/га/год. Наибольшее количество связываемого углерода зафиксировано на

Таблица 3. Количество связанного углерода в зависимости от вида угодий, звена катены и периода зарастания залежей, тС/га

Звено катены, угодье	<i>n</i>	Запас углерода			Ежегодно связываемый углерод		
		ОВР	ОВП	ОВР + ОВП	ОВР	ОВП	ОВР + ОВП
Транзитное, пашня (контроль)	10	1.17 ± 0.28	36.2 ± 9.4	37.4	1.17	0.06	1.23
Транзитное, залежь до 20 лет	10	4.13 ± 0.23	39.0 ± 8.3	43.1	1.71	0.13	1.84
Транзитное, залежь более 20 лет	4	12.60 ± 1.94	38.5 ± 11.2	51.1	2.75	0.27	3.02
Транзитное, лес	6	57.99 ± 5.42	46.4 ± 6.4	104.4	4.78	0.48	5.26
Среднее		18.97 ± 26.46	40.03 ± 4.42	59	2.6	0.24	2.84
Аккумулятивное, пашня (контроль)	8	1.34 ± 0.24	46.9 ± 14.5	48.2	1.34	0.05	1.39
Аккумулятивное, залежь до 20 лет	7	5.21 ± 1.5	48.2 ± 20.5	53.4	3.25	0.24	3.49
Аккумулятивное, залежь более 20 лет	4	14.31 ± 1.71	61.2 ± 10.3	75.5	3.32	0.33	3.65
Аккумулятивное, лес	7	65.42 ± 7.28	64.3 ± 8.8	129.7	5.18	0.52	5.7
Среднее		21.52 ± 32.47	55.15 ± 8.88	76.7	3.28	0.29	3.56

Таблица 4. Выделение углерода в атмосферу в результате разложения органического вещества в зависимости от вида угодий, звена катены и периода зарастания залежей, тС/га/год

Звено катены, угодье	<i>n</i>	ОВП	ОВР	ОВП+ОВР
Транзитное, пашня (контроль)	10	0.31	1.11	1.42
Транзитное, залежь до 20 лет	10	0.39	1.6	1.99
Транзитное, залежь более 20 лет	4	0.39	2.47	2.86
Транзитное, лес	6	0.46	4.35	4.81
Среднее		0.39 ± 0.04	2.38 ± 1.43	2.77 ± 1.47
Аккумулятивное, пашня (контроль)	8	0.47	0.99	1.46
Аккумулятивное, залежь до 20 лет	7	0.48	3.02	3.5
Аккумулятивное, залежь более 20 лет	4	0.61	2.85	3.46
Аккумулятивное, лес	7	0.64	4.77	5.41
Среднее		0.55 ± 0.09	2.91 ± 1.55	3.46 ± 1.61

ключевых площадках лесных угодий, где баланс составил +0.95–1.48 тСО₂/га/год.

Расположение почв на элементах рельефа также оказало значительное влияние на баланс углерода. Повышенная продуктивность почв

аккумулятивного звена катены ввиду лучшей влагообеспеченности растительности, особенно в критические периоды, обусловила увеличение как связанного (на 23.4%), так и выделенного углерода (на 24.5%).

Таблица 5. Годовой баланс углерода в зависимости от вида угодий, звена катены и периода зарастания залежей, тС/га

Звено катены, угодье	Количество связанного углерода, тС/га	Количество выделенного углерода, тС/га	Баланс углерода	
			С	CO ₂
Транзитное, пашня (контроль)	1.23	1.42	–0.19	–0.63
Транзитное, залежь до 20 лет	1.84	1.99	–0.15	–0.49
Транзитное, залежь более 20 лет	3.02	2.85	+0.17	+0.56
Транзитное, лес	5.26	4.81	+0.45	+1.48
Среднее	2.83 ± 1.78	2.76 ± 1.47	+0.07	+0.23
Аккумулятивное, пашня (контроль)	1.39	1.46	–0.07	–0.23
Аккумулятивное, залежь до 20 лет	3.49	3.5	–0.01	–0.03
Аккумулятивное, залежь более 20 лет	3.65	3.46	+0.19	+0.62
Аккумулятивное, лес	5.7	5.41	+0.29	+0.95
Среднее	3.56 ± 1.89	3.45 ± 1.61	+0.09	+0.28

* * *

Объёмы депонирования и эмиссии углерода в атмосферу в подзоне южной тайги зависят в первую очередь от вида угодий. Количество связанного углерода определяется следующими основными факторами:

- на пашне — урожайностью сельскохозяйственных культур;
- на залежах с периодом зарастания до 20 лет — продуктивностью сорно-рудеральной растительности;
- на залежах с периодом зарастания более 20 лет — наличием и степенью их зарастания древесно-кустарниковой растительностью;
- в лесах — видовым составом насаждений и их возрастом;
- интенсивностью процесса гумификации растительного опада.

Максимальный показатель ежегодного депонирования углерода отмечается в лесных угодьях, расположенных на аккумулятивных звеньях катены — 5.7 тС/га, минимальный — на пашне на транзитных звеньях — 1.23 тС/га. Количество связанного углерода на залежах определяется периодом их зарастания и месторасположением на рельефе и изменяется от 1.84–3.49 тС/га (для залежей с периодом зарастания до 20 лет) до 3.02–3.65 тС/га (более 20 лет).

Эмиссия углерода в атмосферу на всех видах угодий обусловлена минерализацией органического вещества растительного опада и почв. Наибольшее количество углерода выделяется также в лесных угодьях, расположенных на аккумулятивных звеньях катены — 5.41 тС/га, минимальный —

на пашне на транзитных звеньях — 1.42 тС/га. Количество поступающего в атмосферу углерода на залежах (в зависимости от периода их зарастания и месторасположения на рельефе) изменяется от 1.99–3.5 тС/га (для залежей с периодом зарастания до 20 лет) до 2.85–3.46 тС/га (более 20 лет). Во всех случаях наибольшие показатели депонирования и выброса углерода в атмосферу наблюдались на аккумулятивных звеньях катен, что объясняется лучшими условиями увлажнения.

Расчёт годового баланса углерода на ключевых площадках показал отрицательный тренд его накопления на пашне, а также на залежах с периодом зарастания до 20 лет. В зависимости от звена катены баланс колебался от –0.01 до –0.19 тС/га. На залежах с периодом зарастания более 20 лет в связи с появлением древесной растительности тренд стал положительным — от +0.17 до +0.19 тС/га. Наибольший положительный баланс — под лесом (от +0.29 до +0.49 тС/га). Таким образом, лесные угодья, ежегодно депонируя наибольшее количество углерода как на транзитных, так и на аккумулятивных звеньях катен, вносят самый значительный вклад в связывание углекислого газа атмосферы в составе органического вещества почв и растений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эдельгериев Р.С.Х., Иванов А.Л., Донник И.М. и др. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)”. Т. 3. М.: Изд-во МБА, 2021.

2. Ларионова А.А., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О. и др. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата // Почвоведение. 2010. № 2. С. 186–195.
3. Bouwman A.F., Germon J.C. Special issue: Soils and climate change. Introduction // Biol. Fert. Soils. 1998. V. 27. P. 219.
4. Распоряжение Правительства РФ от 25.12.2019 г. № 3183-р (ред. от 23.07.2022 г.) “Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года”.
5. Распоряжение Президента РФ от 17.12.2009 г. № 861-рп “О Климатической доктрине Российской Федерации”.
6. Указ Президента РФ от 01.12.2016 г. № 642 (ред. от 15.03.2021 г.) “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”.
7. Houghton R.A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? // Global Change Biology. 2003. V. 9. P. 500–509.
8. Кудяров В.Н. Почвенные источники углекислого газа на территории России // Круговорот углерода на территории России. Избранные научные труды / Ред. Г.А. Заварзин. М.: МФ ГНИЦ ПГК, 1999. С. 165–201.
9. Кудяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф. и др. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 33–42.
10. Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics // Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2008. V. 81. P. 169–178.
11. Spohn M., Novák T.J., Incze J., Giani L. Dynamics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in calcareous soils after land-use abandonment – A chronosequence study // Plant and Soil. 2016. № 1–2. P. 185–196.
12. Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России // Дисс. ... докт. биол. наук. Пушино, 2010.
13. Poeplau C., Don A., Vesterdal L. et al. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach: soil organic carbon and land-use change // Glob. Change Biol. 2011. V. 17. P. 2415–2427.
14. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А. и др. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010.
15. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. et al. Dynamics of Soil Properties and Plant Composition during Postagrogenic Evolution in Different Bioclimatic Zones // Eurasian Soil Science. 2017. № 12. P. 1458–1477.
16. Telesnina V.M., Zhukov M.A. The Influence of Agricultural Land Use on the Dynamics of biological Cycling and Soil Properties in the Course of Postagrogenic Succession (Kostroma Oblast) // Eurasian Soil Science. 2019. № 9. P. 1114–1129.
17. Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 г. № 312-р “Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года”.
18. Бурдуковский М.Л., Перенёлкина П.А. Агроэкологическое состояние почв и восстановление растительности в залежных экосистемах // Биота и среда природных территорий. 2022. № 2. С. 28–36.
19. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Туунен А.В. и др. Динамика свойств почв и экосистемные запасы углерода при разных типах землепользования (средняя тайга Карелии) // Почвоведение. 2022. № 9. С. 1112–1125.
20. Леднёв А.В., Дмитриев А.В. Современные почвообразовательные процессы в постагрогенных дерново-подзолистых почвах Удмуртской Республики // Почвоведение. 2021. № 7. С. 884–896.
21. Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243.
22. Телеснина В.М. Динамика свойств почв южной тайги в ходе постагрогенного лесовосстановления при разных типах сельскохозяйственного использования // Почвы в биосфере: Сб. материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвящённой 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН. 10–14 сентября. Ч. 2. Новосибирск: ТГУ, 2018. С. 159–163.
23. Wang B., Liu G.B., Xue S., Zhu B. Changes in soil physicochemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau // Environmental Earth Sciences. 2011. № 5. P. 915–925.
24. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Сидорова В.А. и др. Влияние типа землепользования на свойства почв и структуру экосистемных запасов углерода в среднетаёжной подзоне Карелии // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1392–1406.
25. Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес Де Гереню В.О. и др. Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303.
26. Комарова Т.В. Сукцессионная динамика потоков CO₂ и запасов органического углерода при зарастании залежи на дерново-палево-подзолистой почве // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения В.П. Горячкина. 6–7 июня 2018 г. М.: РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018. С. 584–588.
27. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E. et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils – a review of drivers and indicators at various scales // Geoderma. 2019. V. 333. P. 149–162.
28. Zomer R.J., Bossio D.A., Sommer R., Verchot L.V. Author Correction: Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils // Sci. Rep. 2021. V. 11 (1). P. 18720. Erratum for: Sci. Rep. 2017. V. 7 (1). P. 15554.
29. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286.

30. *Ковриго В.П.* Почвы Удмуртской Республики. Ижевск: РИО Ижевская ГСХА, 2004.
31. *Кучерин А.П.* Посевная площадь и её структура по Удмуртской Республике // Успешному развитию АПК – научное обеспечение. Т. 2. Ижевск, 2004. С. 100–109.
32. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Удмуртской Республики в 2020 году”. Ижевск: Изд-во ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова, 2021.
33. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004.
34. *Суховеева О.Э.* Поступление органического углерода в почву с послеуборочными остатками сельскохозяйственных культур // Почвоведение. 2022. № 6. С. 737–746.
35. *Воронов А.Г.* Геоботаника. М.: Высшая школа, 1973.
36. Продуктивность травяных экосистем: справочник. М.: Изд-во МБА, 2020.
37. *Грошев Б.И., Синицын С.Г., Мороз П.И., Сеперovich Н.П.* Лесотаксационный справочник. М.: Лесная промышленность, 1980.
38. *Jackson R.B., Mooney H.A., Schulze D.E.* A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. Ecology. 1997. V. 94 (14). P. 7362–7366.
39. *Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980.
40. *Леднёв А.В., Дмитриев А.В.* Заращение залежных дерново-подзолистых почв как фактор современного почвообразовательного процесса // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 5. С. 28–31.
41. *Дмитриев А.В., Леднёв А.В.* Влияние периода заращения на ботанический состав и продуктивность залежных земель // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2016. № 2 (43). С. 7–12.