



Оценка запасов углерода в подстилках и почвах ненарушенных и зоогенно трансформированных кедровников (*Pinus sibirica* Du Tour) юга таежной зоны Западной Сибири

© 2026 А. Н. Никифоров , Л. Г. Никонова , А. Е. Зеленцова , Ю. В. Зубарева , А. А. Маноле

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический, 10/3 стр. 3, Томск, 634055, Россия. E-mail: a.nik-n@mail.ru

Цель исследования. Оценка запасов углерода в почвах и подстилках кедровников, а также изучение начальных этапов деструкции органического вещества растительного опада в условиях ненарушенного и пораженного инвазионным дендрофагом древостоя.

Место и время проведения. Исследования проводили в 2023–2024 гг. в зоогенно нарушенном Лучаново-Ипатовском припоселковом кедровнике и ненарушенном кедровнике вблизи деревни Коломино; оба участка расположены в Томском районе Томской области.

Методы. Исследование скорости разложения растительных остатков проводили методом частично изолированных проб; плотность сложения в подстилках определяли методом монолитов, в минеральных горизонтах методом режущего кольца. В почве стандартными методами определяли актуальную и обменную кислотность, в подстилках – актуальную кислотность и зольность. Оценку содержания общих углерода и азота, и их водорастворимых форм проводили на элементных анализаторах для твердых и жидких сред.

Основные результаты. Запасы углерода в верхней полуметровой толще почв ненарушенных кедровников превышают таковые в нарушенных в 1,4 раза, при этом вклад подстилки в общие запасы углерода в условиях зоогенной трансформации на 9% выше, чем в ненарушенном кедровнике. В поврежденных союзным короедом (*Ips amitinus* Eichh.) лесных экосистемах интенсивность деструкции органического вещества растительных остатков на начальных этапах разложения замедляется на 4–14% в зависимости от типа опада. Высокую доступность для разложения и наименьший вклад в депонирование углерода в почве имели листья *Aegorodium podagraria* (потери органического вещества достигают 94% за 2 месяца). Подстилка демонстрирует значительно меньшую скорость деструкции, что может свидетельствовать о труднодоступности ее компонентов для микроорганизмов.

Заключение. Деградация древесного компонента леса в ходе зоогенной трансформации приводит к комплексным изменениям не только подчиненных ярусов растительности, но и подстилок и почв, оказывая влияние на доступность органического вещества для разложения и, как следствие, секвестрационный потенциал почв.

Ключевые слова: скорость деструкции опада; органическое вещество почвы; запасы почвенного углерода; водорастворимые формы органического вещества почвы.

Цитирование: Никифоров А.Н., Никонова Л.Г., Зеленцова А.Е., Зубарева Ю.В., Маноле А.А. Оценка запасов углерода в подстилках и почвах ненарушенных и зоогенно трансформированных кедровников (*Pinus sibirica* Du Tour) юга таежной зоны Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 1. е347. DOI: [10.31251/pos.v9i1.347](https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.347)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем генетического почвоведения является история формирования почв, а также построение моделей их эволюции в условиях меняющихся факторов внешней среды. В качестве одного из наиболее значимых носителей почвенной памяти выступает гумус. Гумусовый профиль почв представляет собой некое хранилище информации об эволюции природной среды на разных этапах педогенеза (Соколов, 2004; Каллас, 2017).

Несмотря на то, что почва является весьма стабильным пулом углерода и процессы, происходящие в этом природном объекте, протекают медленно, изменение климата, техногенное воздействие, а также гибель лесов под влиянием инвазионных вредителей вызывают трансформации в разных компонентах экосистемы, в том числе и в почвах (Sariyildiz et al., 2008; Kerchev et al., 2024).

Кедровые леса Западной Сибири – обширный природный комплекс площадью 12,7 миллионов гектаров (Данченко, Бех, 2010) – в настоящее время подвергаются воздействию инвазионных вредителей (Кривец и др., 2023б), а глобальные климатические колебания приводят к учащению вспышек их массового размножения и расширению ареала воздействия (Торжков и др., 2019; Ширнина, 2023). Так, союзный короед (*Ips amitinus* Eichh.), широко распространённый в Европе,

активно продвигается на север; в Западной Сибири выявлен в 2019 г. в кедровниках Томской и Кемеровской областей, где массово заселяет кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour), единично – ель сибирскую (*Picea obovata* Ledeb.). Короед поражает верхнюю часть ствола и ветви ослабленных деревьев, вызывая вершинное усыхание кедров. Одни из первых очагов поражения в Томской области зафиксированы в Лучаново-Ипатовском припоселковом кедровнике (Kerchev et al., 2019). Меры по борьбе с новым для данного региона вредителем не принесли ожидаемого эффекта, т.к. на территории Томской области используются методы, лишь ограничивающие распространение инвайдеров, в виде санитарных рубок в очагах размножения (Кривец и др., 2023а). Это вызывает опасения относительно способности сибирских лесов выполнять свои основные экологические функции, связанные с поглощением парниковых газов и сопутствующим поддержанием стабильности биосферы. Так, вспышка размножения другого инвазионного вида – уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford), практически полностью уничтожившего в регионе пихту сибирскую (*Abies sibirica* L.), привела к комплексным трансформациям биогеоценозов и резкому увеличению мощности подстилки, продукты гумификации, которой меланизировали почвенный профиль, увеличивая запасы гумуса (Технологии мониторинга ..., 2018; Kerchev et al., 2024).

Растительный опад в лесных экосистемах играет роль связующего элемента между растениями и почвой, служит источником органического вещества для почв, является одним из ключевых компонентов биогеохимических циклов, способных оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на микробиологическую активность, а, следовательно, напрямую влиять на почвообразовательный процесс (Иванова, 2021; Aponte et al., 2013; Yavitt, Williams, 2015). Подстилка оказывает значительное влияние на почвообразование, создавая особый микроклимат для микроорганизмов (Иванова, 2021; Sayer, 2006; Dupuy, Chazdon, 2008).

Не меньший интерес и важность представляет оценка сопутствующих характеристик: зольности, содержания общего азота, кислотности и др., тесно связанных с запасами углерода и скоростью разложения органического вещества (Семенюк и др., 2020; Федорец, Бахмет, 2003). Однако в результате разрушения лесных экосистем дендрофагами происходит резкое изменение, прежде всего, фракционного состава подстилки: так, в подстилке происходит значительное преобладание элементов коры, хвои, а также сосудистых растений, ранее не характерных для данных территорий, что в целом оказывает влияние на ее химический состав и доступность для микроорганизмов (Шуркина, 2019).

Таким образом, изучение процессов зоогенной трансформации лесных экосистем и их влияния на деструкцию опада и секвестрационную способность почв является весьма актуальным. В связи с этим, целью исследования являлась оценка запасов углерода в почвах и подстилках кедровников, а также изучение начальных этапов деструкции органического вещества растительного опада в условиях ненарушенного и пораженного инвазионным дендрофагом древостоя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности территории исследования. Для исследования выбраны два контрастных по степени зоогенной трансформации фитоценоза – затухший очаг союзного короеда (*Ips amitinus* Eichh.) в Лучаново-Ипатовском припоселковом кедровнике (Ипатово – 56°18'34" с.ш., 85°10'23" в.д.) и ненарушенный кедровник вблизи деревни Коломино (Коломино – 56°34'11" с.ш., 84°44'37" в.д.); оба участка расположены в Томском районе Томской области (рис. 1).

Исследованные кедровники являются монопородными (10К) и исходно относятся к разнотравному типу леса; древостой состоит из *Pinus sibirica* Du Tour и является одновозрастным 3–4 класса возраста. Довольно редкий подлесок Коломинского кедровника представлен, по большей части, малиной обыкновенной (*Rubus idaeus* L.), жимолостью обыкновенной (*Lonicera xylosteum* L.), черемухой обыкновенной (*Padus avium* Mill.), рябиной сибирской (*Sorbus sibirica* (Hedl.) Krylov). Среди трав преобладают осока большехвостая (*Carex macroura* Meinsh.), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.) и другие мелкотравные виды (*Viola mirabilis* L., *Fragaria vesca* L., *Maianthemum bifolium* L.), нередко встречается сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.). Согласно многолетним мониторинговым исследованиям (Бисирова, 2024), стремительные темпы повреждения инвайдером в Ипатовском кедровнике отмечены с 2019 г., к 2024 г. на пробной площади отмечено всего два жизнеспособных дерева (из 93 исходного количества деревьев на корню). На данный момент доминантом среди травянистого яруса является крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), также хорошо распространена *Aegopodium podagraria* L., среди подлеска встречаются заросли *Rubus idaeus*, реже *Padus avium*. В исследуемом участке отмечается крайне низкая сомкнутость древесного полога, что обуславливает значительную долю открытого неба. В сложившихся условиях наблюдается активное

развитие травянистого яруса. При этом признаки возобновления древесных пород на данной территории не зафиксированы.

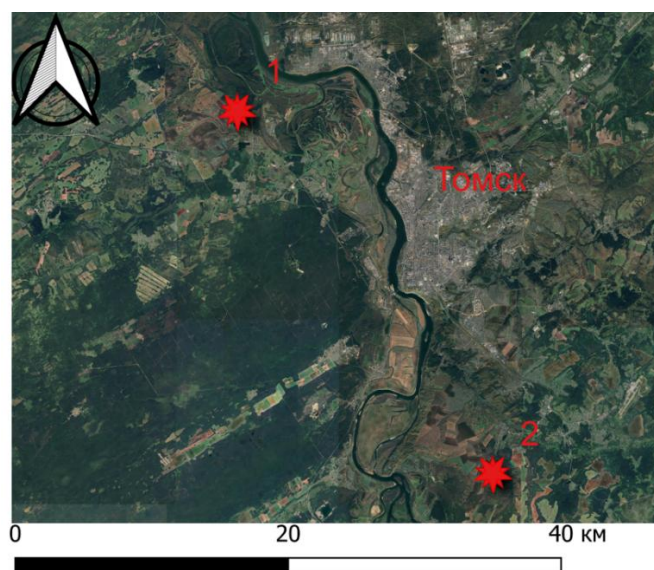


Рисунок 1. Расположение исследуемых участков: 1 – Коломинский припоселковый кедровник, 2 – Лучаново-Ипатовский припоселковый кедровник.

На основе базы данных О.Н. Булыгиной с соавторами (2014) проведен анализ метеорологических параметров за период 1980–2023 гг. Среднегодовая температура воздуха $1,1^{\circ}\text{C}$, минимум наблюдается в январе ($-17,4^{\circ}\text{C}$), максимум в июле ($18,7^{\circ}\text{C}$). Средняя температура вегетационного сезона (с мая по сентябрь) $14,2^{\circ}\text{C}$. Сумма температур выше 5°C , с продолжительностью периода в 162 дня, составляет 2272°C . Среднее количество осадков – 566 мм в год, продолжительность периода с осадками 181 день. Наибольшее количество осадков выпадает в теплый период года с апреля по октябрь. Причем 43% от всех осадков теплого периода приходится на июль-август. Средняя высота снежного покрова равна 40 см. Период с устойчивым снежным покровом длится 172 дня. Таким образом, по классификации Б.П. Алисова (1936) климат района относится к умеренному континентальному.

Изменение температуры оказывает значительное влияние на микробиологическую активность и, следовательно, на скорость деструкции почвенного органического вещества (Добровольская, Звягинцев, 2002; Allen, Banfield, 2005; Throop et al., 2017). На территории исследуемых кедровников проводили круглосуточные измерения температуры воздуха за период 07.06.2024–07.10.2024 при помощи устройств для регистрации температурных данных (Elitech, USA). Средняя температура в Ипатово – $17,0^{\circ}\text{C}$, в Коломино на $1,5^{\circ}\text{C}$ ниже. Максимальная температура в Ипатово $44,5^{\circ}\text{C}$ (30.06.2024), в Коломино 32°C (25.06.2024). Температура воздуха в течение суток в Ипатово изменяется с большей амплитудой, чем в Коломино. Это связано с солнечной радиацией, которая в ненарушенном кедровнике распределяется более равномерно из-за наличия крон деревьев.

Методы исследования почв и подстилок. Для оценки запасов углерода в пределах ненарушенного и нарушенного участков кедровников, из профилей темно-серых типичных почв, широко распространенных на этой территории, формирующихся на покровных и лессовидных, часто окarbonаченных суглинках (Дюкарев, Пологова, 2013), в 2024 году были отобраны образцы органогенных и минеральных горизонтов в пределах генетического профиля.

Горизонты подстилки отбирали полностью и на подгоризонты не разделяли. Отбор органогенных горизонтов производили методом монолитов в трех повторностях по мерной раме площадью 10 на 20 см. Отбор образцов производили с передней стенки почвенного разреза в пределах мощности залегания генетических горизонтов, минеральные горизонты гумусированной толщи отбирали сплошной колонкой каждые 5 см. Дополнительно производили отбор образцов органогенных и минеральных горизонтов почв исследованных участков как на различных элементах микрорельефа (бугры и западины), так и на куртинах с различным напочвенным покровом. Не менее чем на девяти куртинных участках производили отбор надземной фитомассы по мерной раме (1 м^2), после чего выполняли отбор подстилки в трех повторностях. Из полуям, заложенных на месте укосных площадей, были отобраны образцы из минеральных горизонтов сплошной колонкой каждые 5 см. На различных

элементах микрорельефа отбор образцов подстилок и почв делали точно. Из 25 скважин, заложенных почвенным буром, в пяти производили оценку содержания почвенного углерода, а остальные были использованы для оценки пространственной неоднородности мощности гумусированной толщи.

Плотность сложения в подстилках определяли методом монолитов, а в минеральных горизонтах методом режущего кольца (объем 50,24 см³) не менее чем в трех повторностях (Лиштван и др., 1989; Шеин, 2007).

Исследование скорости разложения растительных остатков проводили методом частично изолированных проб (litter bag method) (Козловская и др., 1978; Moore et al., 2017). Опад основных видов-доминантов исследуемых участков, под которым подразумеваются отмершие части растений, собирался в августе 2023 года и разбирался по фракциям: хвоя сосны сибирской кедровой *Pinus sibirica* и листья сныти обыкновенной *Aegopodium podagraria*; также в исследовании использовали подстилку ненарушенного и пораженного союзным короедом кедрового леса. Для обеспечения относительной однородности образцов подстилок из них заранее удаляли крупные элементы (ветки, шишки), а для закладки в условиях исследования подготавливали усредненный образец. Согласно исследованиям Н.Н. Лащинского и А.Ю. Королук (2015), *Aegopodium podagraria* встречается на всех стадиях трансформации лесных экосистем, чем вызывает особый интерес. В нашем случае, сныть распространена на обоих участках, что дает возможность сравнивать скорости разложения этих образцов.

Собранный материал высушивали до воздушно-сухого веса, раскладывали в синтетические мешочки из полиэстера навесками по 8–10 грамм в трехкратной повторности. Подготовленный растительный материал закладывали на поверхность почв, присыпая тонким слоем подстилки (2–3 см). Растительные образцы изымали для анализов через два месяца инкубации.

В лабораторных условиях в растительных и почвенных образцах проведен анализ основных физико-химических характеристик: актуальной кислотности, содержания общего углерода и азота и их водорастворимых форм в почвах и подстилках, зольности органогенных горизонтов. Кислотность подстилок и почвы измеряли потенциометрическим методом при помощи рН-метра (БЗШ-01, Томьяналит, Россия) в водной вытяжке (при соотношении опад : раствор = 1 : 25 и почва : раствор = 1 : 2,5) (Воробьева, 2006). Зольность определяли методом сухого озоления (Лиштван и др., 1989; Гиглѐв, 2012). В растительном опаде, подстилке и образцах почв содержание общего углерода и азота анализировали в трех повторностях при помощи элементного анализатора CHNS-O (VELP Scientifica, Италия). Количественные показатели содержания водорастворимых форм углерода и азота в подстилках и почвах получены с использованием элементного анализатора NC (ТОПАЗ NC Анализатор элементного состава, Россия). Экстракцию проводили из свежих образцов водой, не содержащей CO₂, при соотношении образец : вытеснитель = 1 : 5 (Аринушкина, 1970).

Подготовку почвы к определению общего углерода и азота начинали с ее высушивания до воздушно-сухого состояния. Затем почву выкладывали на лист бумаги и отбирали среднюю пробу методом «квартирования». Из этой пробы методом «конверта» брали 3 грамма и при помощи пинцета и лупы удаляли корешки и растительные остатки. Почву растирали в агатовой ступке до состояния пудры и просеивали через сито с ячейками 0,25 мм (Аринушкина, 1949).

Расчет запасов углерода в подстилках и почве проводили расчетным методом с учетом среднего значения содержания углерода, плотности сложения и мощности слоя (Васенев и др., 2013; Спирина, Соловьева, 2014):

$$3Y = C \times H \times d, \quad (1)$$

где 3Y – запасы углерода почвы, т С га⁻¹; C – содержание углерода, %; H – мощность горизонта, см; d – плотность почвы, г/см³

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2021 и StatSoft Statistica 11.0. Все статистические анализы выполняли при уровне значимости p=0,05. В таблице и на рисунках 2–3 данные представлены в виде средней арифметической со стандартной ошибкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические особенности растительного опада, подстилки и почв. В результате проведения полевых обследований установлено, что для обоих участков характерно преобладание в почвенном покрове темно-серых типичных почв со следующими формулами профиля: АО-АУ-АУ-АУВ-АВ-Вт-ВС-С (ненарушенный Коломенский кедровник); АО-АУ-АУ-АУВ-АУВел-BEL-ВТ-ВС-С (нарушенный Лучаново-Ипатовский кедровник). Выявлено, что мощность горизонтов подстилки в

межкроновой и подкроновой частях обоих участков меняется незначительно и варьирует в пределах 1–5 см. Мощность гумусо-аккумулятивной толщи (горизонты AU и AUB) составляет 50 ± 5 см.

Минеральные горизонты почв исследуемых участков характеризуются слабокислой реакцией среды (pH 5,1–6,0) во всех горизонтах почвенного профиля. Исключение составляет горизонт переходный к почвообразующей породе ненарушенного участка в Коломино (pH 6,8), что обусловлено наличием карбонатов в нижней части почвенного профиля. Это же подтверждается значениями необменной (гидролитической) кислотности, закономерно убывающей к горизонтам почвообразующих пород. Профильное распределение общего углерода характерно для исследуемых темно-серых почв (рис. 2), однако в дерновом горизонте ненарушенного участка наблюдается некоторое увеличение его содержания, что может быть связано как с локальными особенностями рельефа, так и с относительной устойчивостью гумуса, обусловленного, по мнению М.И. Дергачевой (2018), достройкой молекул гумусовых веществ. В распределении водорастворимых форм углерода наблюдаются подобные закономерности, при этом его процентное содержание в почвах ненарушенного и нарушенного участка очень близко и не превышает 1%.

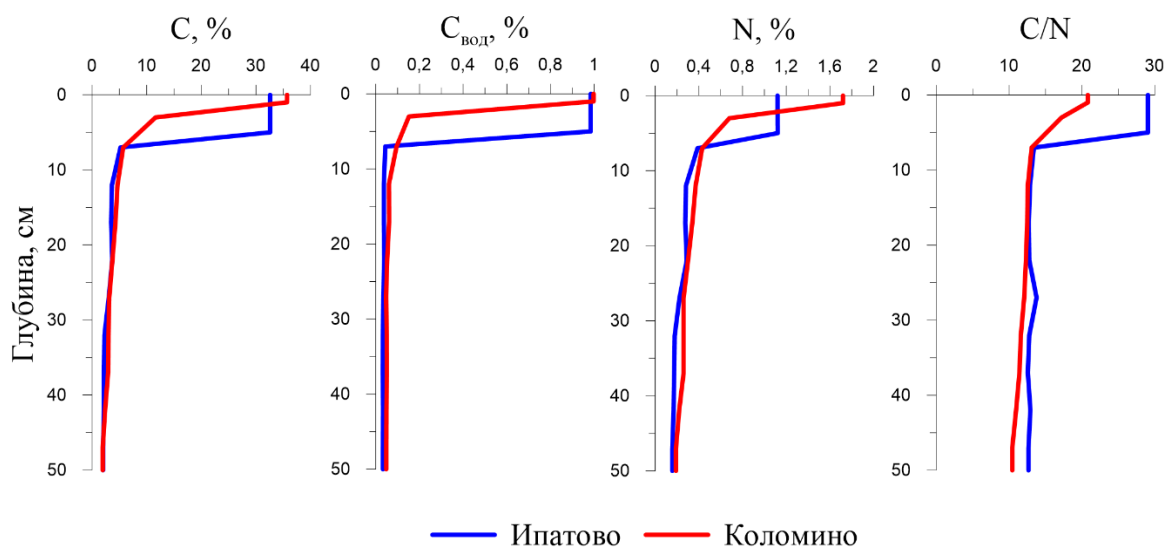


Рисунок 2. Содержание и распределение общего углерода (C), водорастворимых форм углерода ($C_{\text{вод}}$), общего азота (N) и соотношения C/N в 0–50 см слое почв нарушенного (Ипатово) и ненарушенного (Коломино) кедровников.

Аналогичным образом ведет себя и общий азот. Его содержание в верхних горизонтах почвенного профиля составляет 1,7 и 1,1% в ненарушенном и нарушенном участках соответственно. Такие значения связаны, вероятно, с меньшим влиянием факторов внешней среды на изменчивость почвообразования под кедровым лесом, не испытывающим воздействие инвайдера. Исследования показали, что содержание водорастворимых форм азота варьирует от 0,01 до 0,1% в почвах ненарушенного кедрового леса, в то время как в нарушенном кедровнике в Ипатово они присутствуют лишь в грубогумусовом горизонте. Это связано со сменой напочвенного покрова, в котором после отмирания кедровника преобладает крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), и интенсивным поглощением доступных форм азота (Назарюк, 2002; Маркова, Лазарев, 2010; Спирина, Соловьева, 2014) корнями растений-доминантов. Статистический анализ при $p < 0,05$ показал очень высокую корреляционную связь между рассмотренными параметрами. Меньшая связь наблюдается между содержанием общего и водорастворимого углерода ($r=0,7$) и между водорастворимым углеродом и азотом ($r=0,81$) в профиле ненарушенного кедровника. Вместе с тем, соотношение C/N, хоть и незначительно, но сдвигается в сторону его увеличения от нарушенного участка в Ипатово к ненарушенному в Коломино. Это объясняется образованием на поверхности почв свежего опада, меньшим разнообразием растений в напочвенном покрове и низкой деструкционной способностью органического вещества (Титлянова, Шибарева, 2012).

По данным на 2024 год, запасы углерода в верхней полуметровой толще почв (подстилка и минеральные горизонты) в ненарушенном и нарушенном древостое составляют $270,8 \pm 3,08$ и $195,1 \pm 5,39$ т C га⁻¹ соответственно; из них на запасы углерода в горизонтах подстилки приходится 2 и

11%. Примечательно, что более значимые различия в запасах углерода наблюдаются в верхней 10-сантиметровой толще профилей (рис. 3).

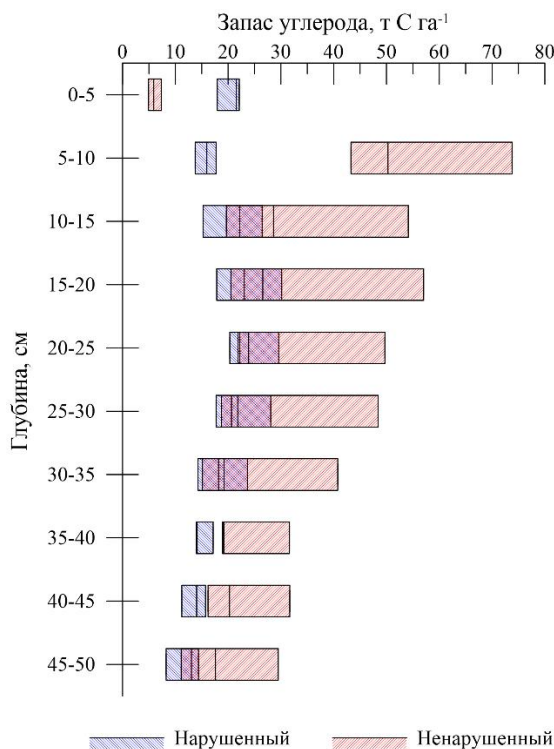


Рисунок 3. Глубинный профиль запасов общего углерода подстилки и почвы в 0–50 см слое нарушенного (Ипатовского) и ненарушенного (Коломинского) припоселковых кедровников (вертикальная линия – медиана).

Запасы водорастворимого углерода изменяются в ряду трансформации следующим образом: в подстилке ненарушенного участка они составляют $0,2 \pm 0,01$ т С га⁻¹, а в органогенном горизонте нарушенного участка – $0,5 \pm 0,02$ т С га⁻¹. В минеральных горизонтах ненарушенного участка запасы водорастворимых форм углерода составляют $4,6 \pm 0,4$ т С га⁻¹, а на нарушенном участке – $0,9 \pm 0,07$ т С га⁻¹. Такое резкое падение запасов водорастворимых форм углерода в Ипатово может быть следствием формирования ячеистой структуры леса типа «окно–дерево» и сменой гидротермических условий, способствующих увеличению скорости миграции продуктов трансформации органического вещества подстилки при дестабилизации условий ее образования, а также с минерализацией мобильных продуктов гумификации.

На основании данных А.Г. Дюкарева и Н.Н. Пологовой (2013), полученных методом мокрого сжигания по Тюрину, произведены расчеты запасов углерода на исследованных участках Коломино и Ипатово до момента появления инвазионного вида дендрофага. Суммарные запасы в полуметровой толще (минеральные горизонты) Коломинского и Ипатовского кедровников составили 180,2 и 117,1 т С га⁻¹ соответственно. Таким образом, за период в более чем 12 лет произошло увеличение запасов углерода в 1,5 раза. При этом мощность подстилки в Ипатовском кедровнике увеличилась с 1 до 5 см, обеспечив прирост запасов общего углерода.

Таким образом, запасы углерода в верхней полуметровой толще почв значительно различаются между ненарушенным и зоогенно трансформированным участками, что может быть связано как с исходными особенностями почвообразовательного процесса в данных фитоценозах, так и, возможно, воздействием инвазионных видов на экосистему в случае изменения скорости деструкции органического вещества.

Исходные физико-химические свойства опада, участвовавшего в деструкционном эксперименте, значительно варьировали (таблица). Высоким содержанием общего азота и углерода, узким соотношением С/Н, а следовательно, большей доступностью для микроорганизмов-деструкторов отличались листья *Aegopodium podagraria*. По содержанию азота и углерода подстилки двух участков характеризовались близкими значениями, однако несколько большее содержание общего углерода отмечалось в подстилке, собранной в ненарушенном лесу. Содержание золы также указывает на

значительную долю органического вещества (93%) в этом образце. Максимальными значениями зольности характеризуется подстилка нарушенного кедровника, что объясняется более высокой ее минерализацией и наличием значительного количества опада крапивы, богатого зольными элементами (Ушанова и др., 2001). Соотношение C/N свидетельствует, что хвоя *Pinus sibirica* являлась достаточно доступной к разложению, однако низкое значение актуальной кислотности (Пономарев, 2016) и наличие смол (Титлянова, Шибарева, 2012) может снижать активность микроорганизмов и затруднять ее деструкцию.

Таблица

Исходные физико-химические характеристики растительного опада и подстилки, участвовавших в деструкционном эксперименте

Растительные остатки	Зольность, %	C, %	N, %	C/N	pH _{акт}
Хвоя <i>Pinus sibirica</i>	3,5±0,1	47,5±0,9	1,7±0,2	28,0±3,7	4,5±0,3
Подстилка нарушенного кедрового леса	30,3±1,0	32,6±0,4	1,1±0,1	29,1±2,2	6,3±0,2
Подстилка ненарушенного кедрового леса	6,6±0,5	37,7±0,4	1,3±0,1	29,9±2,7	5,6±0,3
Листья <i>Aegopodium podagraria</i>	11,4±0,6	41,5±1,1	2,6±0,4	16,3±1,4	6,8±0,3

Разложение растительного опада и подстилки на начальных этапах деструкции. На начальных этапах деструкции, как правило, происходят максимальные потери массы за счет разложения наиболее доступных компонентов свежего растительного опада (Титлянова, Шибарева, 2012; Добровольская и др., 2013; Никонова и др., 2019). В связи с этим, исследования первых этапов разложения играют важную роль в изучении вклада того или иного компонента в круговорот углерода. В результате наших исследований, как в Ипатово, так и в Коломино, наибольшими потерями за инкубационный период (2 месяца) характеризуются листья *Aegopodium podagraria*, наименьшими – подстилки (рис. 4). Нарушение целостности лесного полога вызывает изменение условий для почвенной микробиоты, в том числе, за счет более амплитудного суточного хода температур, что отражается на скорости деструкционных процессов. Примечательно, что более интенсивно деструкция происходит в условиях ненарушенного кедровника. Высокая деструкционная способность в ненарушенных условиях, вероятно, объясняется меньшими колебаниями температуры и низким значением C/N почвы, в которой происходит разложение. Кроме того, замедление деструкционных процессов, связанное с зоогенным поражением леса, объясняется изменениями, происходящими с почвенной микрофлорой (Skelton et al., 2019, 2020). В исследованиях (Brouillard et al., 2017) отмечается снижение эмиссии CO₂ почвенными микроорганизмами в пораженных короедами лесах, что объясняется, в том числе, сокращением симбиотических микробных сообществ, связанных с корнями после гибели деревьев (Štursová et al., 2014). Также в работах (Findlay et al., 1996) в качестве причины замедления деструкционных процессов в экосистемах после вспышки распространения вредителей отмечается увеличение концентрации труднорастворимых соединений, а в работах (Cobb et al., 2006) – изменение влажности лесной подстилки. Немаловажную роль играет тот факт, что с короедами, обитающими на хвойных растениях, связан комплекс симбиотических грибов, который способен ингибировать деятельность почвенных микроорганизмов-деструкторов (Пашенова и др., 2022; Skelton et al., 2019, 2020). В работах по изучению влияния зоогенной трансформации на свойства почв и скорость разложения подстилки (Findlay et al., 1996; Chapman et al., 2003; Cobb et al., 2003; Hunter, 2001; Sariyildiz et al., 2008) отмечается, что изменения варьируют в зависимости от видов насекомых и доминирующих древесных пород.

Для всех исследуемых образцов выявлена корреляция между потерями углерода и потерями массы на начальных этапах деструкции ($r=0,52$, $p<0,05$). Минимальные потери углерода характерны для подстилки (в среднем 18% от исходного содержания углерода), а максимальные – для *Aegopodium podagraria* (в среднем 92,5% от исходного содержания углерода) (рис. 5).

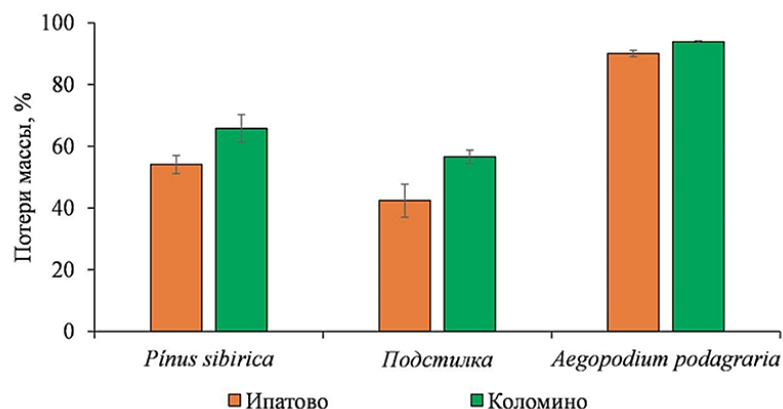


Рисунок 4. Потери массы органического вещества при разложении опада лесной растительности и подстилки в припоселковых кедровниках.

Вынос азота на начальных этапах деструкции происходит в зависимости от места закладки и вида растительного образца: максимальные потери зафиксированы для листьев сныти, минимальные – хвои в условиях поврежденного кедровника и подстилки в ненарушенных условиях. В исследованиях (Sariyildiz et al., 2008) наблюдался рост содержания азота по отношению к исходному значению в зоогенно трансформированных условиях. Накопление азота и его потери могут значительно варьировать в зависимости от экологических условий и начального качества растительного материала (Кондратова и др., 2021; Liu et al., 2016; Throop et al., 2017). Как уже было сказано ранее, соотношение C/N является показательным: чем оно уже, тем более доступным для деятельности микроорганизмов оказывается субстрат (Добровольская и др., 2013; Пансю, Готеру, 2014). В ходе краткосрочной деструкции выявлено сужение этого соотношения для всех образцов, кроме подстилки ненарушенного леса, в которой данный показатель, напротив, растет ($C/N=44$).

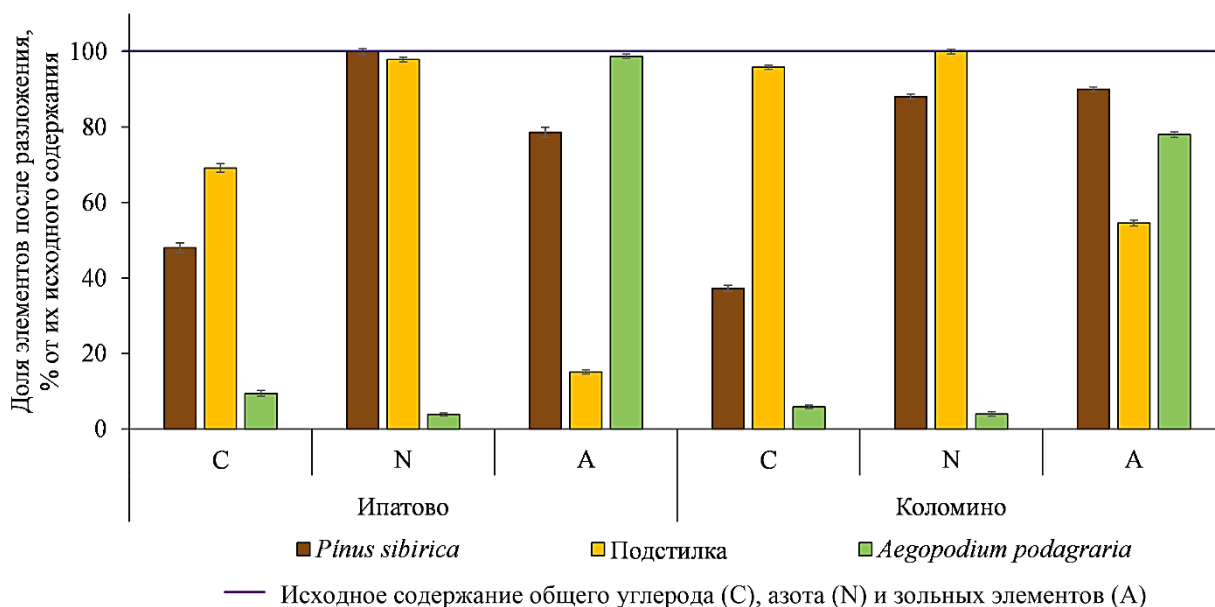


Рисунок 5. Изменение содержания общего углерода (C), азота (N) и зольности (A) опада растительности и подстилки кедровников на начальных этапах деструкции (по отношению к количеству этих же показателей в исходном образце, %).

Важное влияние на динамику и скорость разложения оказывает зольность (Frost et al., 2005, Sariyildiz et al., 2008). Максимальное снижение зольности характерно для подстилки как нарушенных, так и ненарушенных участков (рис. 5). В процессе минерализации органического вещества зольность может снижаться (Головацкая, Никонова, 2025) за счет потребления растениями или микроорганизмами зольных элементов (Кылли, 1977). Кроме того, может наблюдаться выщелачивание некоторых элементов, таких как калий, азот, фосфор, кальций и магний, из подстилки в нижележащие

горизонты почвы (Климчик, Рихтер, 2004). В наших исследованиях выявлено, что условия зоогенно-трансформированного фитоценоза способствуют менее активному снижению зольности при деструкции листьев сныти и, напротив, более интенсивному выносу зольных элементов из хвои сосны на начальных этапах деструкции. В ходе сукцессии часто наблюдается уменьшение зольности подстилки, что связано с изменением состава опада и снижением скорости биологического круговорота (Богатырев и др., 2020).

Таким образом, изменение содержания углерода, азота и зольных элементов в подстилке при зоогенном нарушении экосистем, в долгосрочной перспективе может приводить к изменению углерод-депонирующей функции данных фитоценозов. При этом важно отметить, что, зачастую, химический состав растительного опада оказывают большее влияние в сравнении с абиотическими факторами, такими как температура и влажность (Wardle et al., 2003; Sariyildiz et al., 2008).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных исследованиях установлено, что вклад подстилки в общие запасы углерода в условиях зоогенной трансформации на 9% выше, чем в ненарушенном кедровнике. На основе результатов исследования и литературных данных рассчитано, что за 12-летний период в деградированном кедровнике Ипатово наблюдается тренд увеличения запасов общего углерода в почве за счет роста мощности органогенного горизонта. В условиях нарушенного кедровника обнаружен рост запасов водорастворимых форм углерода в подстилке и их резкое снижение в минеральных горизонтах почвенного профиля, что связано с нарушением биогеохимического цикла углерода вследствие изменения гидротермических условий.

При деградации древесного компонента леса происходит трансформация, как подчиненных ярусов растительного покрова, так и подстилок и почв; последние в условиях высокой гумусированности изменяются с меньшей скоростью. Однако выявлено, что в условиях трансформации, даже за краткосрочный период (5–6 лет с момента гибели древостоя), в верхнем минеральном горизонте происходит заметная аккумуляция почвенного органического вещества. Полученные результаты указывают на то, что в условиях зоогенной трансформации лесных экосистем интенсивность деструкции на начальных этапах разложения (2 месяца) замедляется; следовательно, этот процесс в дальнейшем может повлиять и на углерод-депонирующую способность почв. Наиболее выраженные потери массы и углерода, наблюдаемые у листьев *Aegopodium podagraria*, свидетельствуют о высокой доступности этих компонентов для разложения и последующем наименьшем их вкладе в депонирование углерода в почве. В то же время, подстилка демонстрирует значительно меньшую скорость деструкции, что может свидетельствовать о труднодоступности ее компонентов для микроорганизмов.

Полученные данные могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на более глубокое понимание процессов почвообразования и их влияния на углеродный баланс в экосистемах, подверженных зоогенным трансформациям, а также на разработку эффективных стратегий управления лесными ресурсами.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной темы «Потоки и баланс углерода в лесных и болотных экосистемах юга таежной зоны Западной Сибири: комплексный мониторинг, анализ и прогноз» (FWRG-2025-0002, Регистрационный номер 1024100800092-1).

ЛИТЕРАТУРА

Алисов Б.П. Географические типы климатов // Метеорология и гидрология / Центр. упр. единой Гидромет. службы СССР; ГГО. Москва: Сельхозгиз, 1936. № 6.

Аринушкина Е.В. Валовой химический анализ почв и грунтов. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1949. 178 с.

Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.

Бисирова Э.М. Изменение состояния кедровых древостоев в очагах массового размножения инвазионного вредителя – союзного короеда в Томской области // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы, и их роль в лесных экосистемах (XIII Чтения памяти О.А. Катаева). Материалы Всероссийской конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 28 октября – 01 ноября 2024 г.) / под редакцией А.В. Селиховкина,

Ю.Н. Баранчикова, Н. Н. Карпун, М. Ю. Мандельштам и В.И. Пономарёва. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. С. 9–13.

Богатырев Л.Г., Телеснина В.М., Семенюк О.В., Бенедиктова А.И. Динамика морфологии и химических свойств лесной подстилки в ходе естественного постагрогенного лесовосстановления и ее отражение напочвенным покровом // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2020. № 3. С. 3–11.

Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России, 2014 [Электронный ресурс]. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=19> (дата обращения 10.01.2025).

Васенев В.И., Прокофьева Т.В., Макаров О.А. Разработка подхода к оценке запасов почвенного органического углерода мегаполиса и малого населенного пункта // Почвоведение. 2013. №. 6. С. 725–725. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13060117>

Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.

Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Изменение химического состава растительного опада в процессе разложения в условиях олиготрофного болота // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. с344. <https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344>

Гиглёв В.Ю. Физика почв: Учебно-методическое пособие. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2012. 37 с.

Данченко А.М., Бех И.А. Кедровые леса Западной Сибири. Томск: Томский государственный университет, 2010. 424 с.

Дергачева М.И. Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 292 с. <https://doi.org/10.15372/SYSTEM2018DMI>

Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г., Инишева Л.И., Кураков А.В., Смагин А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Семенова Т.А., Степанов А.Л., Глушакова А.М., Початкова Т.Н., Кухаренко О.С., Качалкин А.В., Якушев А.В., Поздняков Л.А., Богданова О.Ю. Функционирование микробных комплексов верховых торфяников – анализ причин медленной деструкции торфа / под ред. И. Ю. Чернова. Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 131 с.

Добровольская Т.Г. Звягинцев Д.Г. Структура бактериальных сообществ почв. Москва: Академкнига, 2002. 283 с.

Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Почвы припоселковых кедровников // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. Том 2 № 22. С. 7–22.

Иванова Е.А. Формирование и разложение древесного опада в лесных экосистемах в фоновых условиях и при аэротехногенном загрязнении // Вопросы лесной науки. 2021. Том 4. № 3. С. 1–52. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202143-87>

Каллас Е.В. Разнообразие гумусовых профилей почв экотона тайга-степь юго-восточной части Западной Сибири // Вестник Оренбургского государственного университета. 2017. Том 12. № 212. С. 7–11.

Климчик Г.Я., Рихтер И.Э. Пирогенное влияние на лесную подстилку и верхний горизонт почвы // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 1. Лесное хозяйство. 2004. С. 99–101.

Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Ленинград: Наука ЛО, 1978. 172 с.

Кондратова А.В., Абрамова Е.Р., Брянин С.В. Разложение основных типов опада и высвобождение азота в постпирогенных лиственничниках Дальнего Востока России // Сибирский экологический журнал. 2021. Том 28. № 2. С. 214–226. <https://doi.org/10.15372/SEJ20210207>

Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Смирнова Н.А., Пац Е.Н. Союзный короед - новый вызов для лесозащиты в Сибири // Сибирский лесной журнал. 2023а. № 1. С. 43–57. <https://doi.org/10.15372/SJFS20230105>

Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Волкова Е.С., Мельник М.А., Смирнов Н.А., Пац Е.Н. Вспышка массового размножения и оценка риска распространения союзного короеда в кедровых лесах Томской области // Лесоведение. 2023б. № 2. С. 116–131. <https://doi.org/10.31857/S0024114823020031>

Кылли Р.К. Динамика фракционного и зольного состава лесных подстилок на буро-псевдоподзолистых, бурых лесных и рендинных почвах // Почвоведение 1977. № 2. С. 81–92.

Лашинский Н.Н., Королук А.Ю. Синтаксономия темнохвойных зональных лесов южной тайги Западно-Сибирской равнины и гумидных низкогорий Алтае-Саянской горной области // Растительность России. 2015. № 26. С. 85–107.

- Лиштван И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И., Терентьев А.А. Физика и химия торфа: Учеб. пособие для вузов. Москва: Недра, 1989. 303 с.
- Маркова Е.В., Лазарев А.В. Особенности морфологии вегетативных побегов *Urtica dioica* L. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2010. № 15(86). С. 34–39.
- Назарюк В.М. Баланс и трансформация азота в агросистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 257 с.
- Никонова Л.Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1092–1103. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19090065>
- Пансю М., Готеру Ж. Анализ почвы: Минералогические, органические и неорганические методы анализа / пер. 2-го англ. изд. под ред. Д.А. Панкратова. Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия», 2014. 800 с.
- Пашенова Н.В., Кабилов М.Р., Керчев И.А. Офиостомовые грибы, переносимые союзным короедом в Томской области // Проблемы лесной фитопатологии и микологии: Материалы XI международной конференции (Петрозаводск, 10–14 октября 2022 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук. 2022. С. 51–53.
- Пономарев А.Я. Влияние pH среды на способность к перемещению загрязняющих веществ в почве // Роль и место информационных технологий в современной науке: Сборник статей Международной научно-практической конференции (Саранск, 03 февраля 2016 г.) / Ответственный редактор Сукиасян Асатур Альбертович. Том 2. Саранск: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2016. С. 242–244.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43. <http://dx.doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
- Соколов И.А. Теоретические проблемы генетического почвоведения. Новосибирск: Гуманитарные технологии, 2004. 288 с.
- Спирина В.З., Соловьева Т.П. Агрохимические методы исследования почв, растений и удобрений: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 336 с.
- Технологии мониторинга пихтовых лесов в зоне инвазии уссурийского полиграфа в Сибири. Методическое пособие. Томск: УМНИУМ, 2018. 74 с.
- Титлянова А.А., Шибарева С.В. Подстилки в лесных и травяных экосистемах / отв. ред. Э.Ф. Ведрова. Новосибирск: Изд-во Сибирского отд-ния Российской акад. наук, 2012. 134 с.
- Торжков И.О., Кушнир Е.А., Константинов А.В., Королева Т.С., Ефимов С.В., Школьник И.М. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 40–49.
- Ушанова В.М., Лебедева О.И., Репях С.М. Исследование влияния условий произрастания на химический состав крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.) // Химия растительного сырья. 2001. № 3. С. 97–104.
- Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. 240 с.
- Шейн Е.В. Теории и методы физики почв: Коллективная монография / Под ред. Е.В. Шейна и Л.О. Карпачевского. Москва: «Гриф и К», 2007. 616 с.
- Ширнина Л.В. Интродукция растений – один из путей распространения инвазионных организмов на лесных древесных растениях // Актуальные вопросы сохранения биоразнообразия и устойчивости природных и искусственных растительных сообществ: Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции (Воронеж, 27 апреля 2023 г.) / Отв. редактор Ю.В. Чеkmенева. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2023. С. 87–92. https://doi.org/10.58168/CCIBSNAPC_87-92
- Шуркина В.В. Изменение запаса и фракционного состава лесной подстилки в кедровниках, пораженных шестизубчатым короедом (участок "Малый Абакан" заповедника "Хакасский") // Успехи современного естествознания. 2019. № 3–1. С. 40–45.
- Allen E., Banfield J. Community genomics in microbial ecology and evolution // Nature Reviews Microbiology. 2005. No. 3. P. 489–498. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1157>
- Aponte C., Garcia L., Maranon T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 309. P. 36–46. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2013.05.035>

- Brouillard B.M., Mikkelsen K.M., Bokman C.M., Berryman E.M., Sharp J.O. Extent of localized tree mortality influences soil biogeochemical response in a beetle-infested coniferous forest // *Soil Biology and Biochemistry*. 2017. Vol. 114. P. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.016>
- Chapman S.K., Hart S.C., Cobb N.S., Whitham T.G., Koch G.W. Insect herbivory increases litter quality and decomposition: an extension of the acceleration hypothesis // *Ecology*. 2023. Vol. 84. No. 11. P. 2867–2876. <https://doi.org/10.1890/02-0046>
- Cobb R.C., Orwig D.A., Currie S. Decomposition of green foliage in eastern hemlock forests of southern New England impacted by hemlock woolly adelgid infestations // *Canadian Journal of Forest Research*. 2003. Vol. 36. No. 5. P. 1331–1341. <https://doi.org/10.1139/X06-012>
- Dupuy J.M., Chazdon R.L. Interacting effects of canopy gap, understory vegetation and leaf litter on tree seedling recruitment and composition in tropical secondary forests // *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 255. No. 11. P. 3716–3725. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.021>
- Findlay S., Carreiro M., Krischick V., Jones C.G. Effects of damage to living plants on leaf litter quality // *Ecological Applications*. 1996. Vol. 6. No. 1. P. 269–275. <https://doi.org/10.2307/2269570>
- Frost P., Evans-White M., Finkel Z., Jensen T., Matzek V. Are you what you eat? Physiological constraints on organismal stoichiometry in an elementally imbalanced world // *Oikos*. 2005. Vol. 109. No. 1. P. 18–28. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.14049.x>
- Hunter M.D. Insect population dynamics meets ecosystem ecology: effects of herbivory on soil nutrient dynamics // *Agricultural & Forest Entomology*. 2001. Vol. 3. No. 2. P. 77–84. <https://doi.org/10.1046/j.1461-9563.2001.00100.x>
- Kerchev I.A., Mandelshtam M.Yu., Krivets S.A., Ilinsky Yu.Yu. Small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhof, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): a new alien species in West Siberia // *Entomological Review*. 2019. Vol. 99. No. 5. P. 639–644. <https://doi.org/10.1134/S0013873819050075>
- Kerchev I.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A., Grachev I.G., Nikiforov A.N., Kalashnikova D.A. Effects of an Invasive Bark Beetle *Polygraphus proximus* Blandf. Outbreak on Carbon Pool Dynamics in West Siberian Dark Coniferous Forests // *Forests*. 2024. Vol. 15. No. 3. P. 542. <https://doi.org/10.3390/f15030542>
- Liu C., Liu Y., Guo K., Zhao H., Qiao X., Wang S., Zhang L., Cai X. Mixing litter from deciduous and evergreen trees enhances decomposition in a subtropical karst forest in southwestern China // *Soil Biology and Biochemistry*. 2016. Vol. 101. P. 44–54. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3077-9>
- Moore T., Trofymow J., Prescott C., Titus B. Can short-term litter-bag measurements predict long-term decomposition in northern forests? // *Plant and soil*. 2017. Vol. 416. No. 1. P. 419–426. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3228-7>
- Sariyildiz T., Akkuzu E., Küçük M., Duman A., Aksu Y. Effects of *Ips typographus* (L.) damage on litter quality and decomposition rates of oriental spruce [*Picea orientalis* (L.) Link.] in Hatila Valley National Park, Turkey // *European Journal of Forest Research*. 2008. Vol. 127. P. 429–440. <https://doi.org/10.1007/s10342-008-0226-6>
- Sayer E. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems // *Biological Reviews*. 2006. Vol. 81. No. 1. P. 1–31. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006846>
- Skelton J., Jusino M., Carlson P., Smith K., Banik M., Lindner D., Palmer J., Hulcr J. Relationships among wood-boring beetles, fungi, and the decomposition of forest biomass // *Molecular Ecology*. 2019. Vol. 28. No. 22. P. 4971–4986. <https://doi.org/10.1111/mec.15263>
- Skelton J., Loyd A., Smith J., Blanchette R., Held B., Hulcr J. Fungal symbionts of bark and ambrosia beetles can suppress decomposition of pine sapwood by competing with wood-decay fungi // *Fungal Ecology*. 2020. Vol. 45. P. 100926. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2020.100926>
- Štursová M., Šnajdr J., Cajthaml T., Bárta J., Šantrůčková H., Baldrian P. When the forest dies: the response of forest soil fungi to a bark beetle-induced tree dieback // *The ISME journal*. 2014. Vol. 8. No. 9. P. 1920–1931. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.37>
- Throop H.L., Abu Salem M., Whitford W.G. Fire enhances litter decomposition and reduces vegetation cover influences on decomposition in a dry woodland // *Plant Ecology*. 2017. Vol. 218. No. 7. P. 799–811. <https://doi.org/10.1007/s11258-017-0730-1>
- Yavitt J.B., Williams C.G. Conifer litter identity regulates anaerobic microbial activity in wetland soils via variation in leaf litter chemical composition // *Geoderma*. 2015. Vol. 243. P. 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.023>
- Wardle D.A., Nilsson M.C., Zackrisson O., Gallet C. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. Vol. 35. No. 6. P. 827–835. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00118-4)

Поступила в редакцию 05.12.2025

Принята 20.01.2026

Опубликована 03.02.2026

Сведения об авторах:

Никифоров Артём Николаевич – младший научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); a.nik-n@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-3273-9043>

Никонова Лилия Гарифулловна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); Lili112358@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1759-5082>

Зеленцова Анастасия Евгеньевна – младший научный сотрудник лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); nastya_zel@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-5992-9635>

Зубарева Юлия Владимировна – инженер лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); ulia_zubareva2509@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0586-9380>

Маноле Анастасия Анатольевна – инженер лаборатории мониторинга углеродного баланса наземных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); matyukhina_nastya08@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3964-2444>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Assessment of carbon stocks in litter and soils of undisturbed and zoogenically damaged Siberian pine forests (*Pinus sibirica* Du Tour) in the southern taiga zone of West Siberia

© 2026 A. N. Nikiforov , L. G. Nikonova , A. E. Zelentsova , Y. V. Zubareva ,

A. A. Manole 

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the RAS, Akademicheskyy ave. 10/3, Tomsk, Russia. E-mail: a.nik-n@mail.ru

The aim of the study. Assessment of soil and litter carbon stocks, as well as the study of the initial stages of organic matter decomposition of plant litter under conditions of undisturbed and dendrophagous-invaded forest stands.

Location and time of the study. The research was conducted in the zoogenically disturbed Luchanovo-Ipatovsky suburban cedar forest and in the undisturbed cedar forest near the village of Kolomino, both sites located in the Tomsk District of the Tomsk Region.

Methods. Plant residue decomposition rate was studied using the partially isolated sample method. Litter bulk density was determined using the monolith method, and soil bulk density in mineral horizons was determined by the cutting ring method. Standard methods were used to determine actual and non-exchangeable acidity in soil, and actual acidity and ash content in litter. The content of total and water-soluble carbon and nitrogen was assessed using elemental analyzers for solid and liquid media.

Results. The carbon stocks in the upper 50 cm soil layer of undisturbed cedar forests exceeded those in disturbed forests by 1.4 times. The contribution of litter in the total carbon stocks under zoogenic transformation was 9% higher than in the undisturbed cedar forests. In zoogenically disturbed forest ecosystems (*Ips amitinus* Eichh.), the intensity of decomposition slowed down at the initial stages of decomposition (depending on the type of litter, 4-14%). The leaves of *Aegopodium podagraria* are characterized by high availability for decomposition and the lowest contribution in carbon sequestration by the soil (organic matter losses reached 94% in 2 months). The litter demonstrated significantly lower decomposition rate, which may indicate that it was not readily available for utilisation by microorganisms.

Conclusions. Degradation of wood during zoogenic transformation resulted in complex changes in understorey vegetation, litter and soil layers, affecting the availability of organic matter for decomposition and soil sequestration potential.

Keywords: litter decomposition rate; soil organic matter; soil carbon stocks; water-soluble forms of soil organic matter.

How to cite: Nikiforov A.N., Nikonova L.G., Zelentsova A.E., Zubareva Y.V., Manole A.A. Assessment of carbon stocks in litter and soils of undisturbed and zoogenically damaged Siberian pine forests (*Pinus sibirica* Du Tour) in the southern taiga zone of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2026. 9(1). e347. DOI: [10.31251/pos.v9i1.347](https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.347) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the research topic «Carbon fluxes and balance in forest and bog ecosystems of the southern taiga zone of Western Siberia: comprehensive monitoring, analysis and forecasting» (FWRG-2025-0002, Registration number 1024100800092-1).

REFERENCES

- Alisov B.P. Geographical types of climates. Meteorology and Hydrology / Central Administration of the Unified Hydrometeorological Service of the USSR; GGO. Moscow: Selkhozgiz, 1936. No. 6. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Gross chemical analysis of soils and sediments. Moscow: Moscow University Publishing House, 1949. 178 p. (in Russian).
- Arinushkina E.V. Guide to chemical analysis of soils. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Moscow University Publishing House, 1970. 487 p. (in Russian).
- Bisirova E.M. Changes in the state of cedar stands in areas of mass reproduction of the invasive pest – the allied bark beetle in the Tomsk region. In book: Dendrobiont invertebrate animals and fungi, and their role in forest ecosystems (XIII Readings in memory of O.A. Kataev). Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation (St. Petersburg, 28 October – 1 November, 2024) / edited by A.V. Selikhovkin, Yu.N. Baranchikov, N.N. Karpun, M.Yu. Mandelshtam and V.I. Ponomarev. St. Petersburg: SPbSTU, 2024. P. 9–13. (in Russian).
- Bogatyrev L.G., Telesnina V.M., Semenjuk O.V., Benediktova A.I. The dynamics of the morphology and chemical properties of forest litter during natural post-agrogenic reforestation and its reflection on the ground cover. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie (Lomonosov Soil Science Journal)*. 2020. No. 3. P. 3–11. (in Russian).
- Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Description of the array of urgent data on basic meteorological parameters at stations in Russia, 2014 [Electronic resource]. Certificate of state registration of the database No. 2014620549. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=19> (accessed on 01.10.2025). (in Russian).
- Vasenev V.I., Prokofeva T.V., Makarov O.A. The development of approaches to assess the soil organic carbon pools in megapolises and small settlements. *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46. No. 6. P. 685–696. <https://doi.org/10.1134/S1064229313060100>
- Vorobyova L.A. Theory and practice of chemical analysis of soils. Moscow: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Nikonova L.G. Changes in the chemical composition of plant litter during decomposition in an oligotrophic peatland. *The Journal of Soils and Environment*. 2025. Vol. 8. No. 4. e344. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.344>
- Giglev V.Yu. Soil Physics: Textbook. Perm: Perm University Press, 2012. 37 p. (in Russian).
- Danchenko A.M., Bekh I.A. Cedar forests of Western Siberia. Tomsk: Tomsk State University, 2010. 424 p. (in Russian).
- Dergacheva M.I. The system of humic substances as a basis for the diagnosis of paleosols and the reconstruction of the paleo-natural environment. Novosibirsk: SB RAS Publishing House, 2018. 292 p. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SYSTEM2018DMI>
- Dobrovolskaya T.G., Golovchenko A.V., Zvyagintsev D.G., Inisheva L.I., Kurakov A.V., Smagin A.V., Zenova G.M., Lysak L.V., Semenova T.A., Stepanov A.L., Glushakova A.M., Pochatkova T.N., Kukharenko O.S., Kachalkin A.V., Yakushev A.V., Pozdnyakov L.A., Bogdanova O.Yu. Functioning of microbial complexes of raised peatlands – analysis of the causes of slow peat decomposition / edited by I.Yu. Chernov. Moscow: KMK Scientific Press Partnership, 2013. 131 p. (in Russian).
- Dobrovolskaya T.G., Zvyagintsev D.G. Structure of bacterial soil communities. Moscow: Akademkniga, 2002. 283 p. (in Russian).

- Dyukarev A.G., Pologova N.N. Soils of *Pinus sibirica* forests near settlements. Tomsk State University Journal of Biology. 2013. Vol. 2. No. 22. P. 7–22. (in Russian).
- Ivanova E. Tree litter production and decomposition in forest ecosystems under background conditions and industrial air pollution. Forest Science Issues. 2021. Vol. 4. No. 3. P. 1–52. (in Russian). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202143-87>
- Kallas E.V. Diversity of humus profiles of soils of ecotone, taiga-steppe south-eastern part of Western Siberia. Vestnik of the Orenburg State University. 2017. Vol. 12. No. 212. P. 7–11. (in Russian).
- Klimchik G.Ja., Rihter I.Je. Pyrogenic impact on forest litter and upper soil horizon. Proceedings of Belarusian State Technological University (Proceedings of BSTU). No. 1. Forestry. 2004. P. 99–101. (in Russian)
- Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Pyauchenko N.I. Dynamics of organic matter in the peat formation process. Leningrad: Nauka LO, 1978. 172 p. (in Russian).
- Kondratova A.V., Abramova E.R., Bryanin S.V. Decomposition of main litter types and nitrogen release in post-fire larch forests of the Russian Far East. Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14. No. 2. P. 171–181. <https://doi.org/10.1134/S1995425521020050>
- Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A., Pats E.N. Small spruce bark beetle as a new challenge for forest protection in Siberia. Siberian Journal Forestry Science. 2023a. No. 1. P. 43–57. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20230105>
- Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Melnik M.A., Smirnov N.A., Pats E.N. A mass reproduction outbreak and estimation of the spreading risks for the small spruce bark beetle in cedar pine forests of the Tomsk region. Forest Science. 2023b. No. 2. P. 116–131. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0024114823020031>
- Kylli R.K. Dynamics of fractional and ash composition of forest litter on brown-pseudopodzolic, brown forest and rendzina soils. Pochvovedenie. 1977. No. 2. P. 81–92. (in Russian).
- Lashchinsky N.N., Korolyuk A.Yu. Syntaxonomy of zonal dark-coniferous forests of the West Siberian southern taiga and the Altai-Sayan humid low-mountains. Vegetation of Russia. 2015. No. 26. P. 85–107. (in Russian).
- Lishchvan I.I., Basin E.T., Gamaunov N.I., Terentev A.A. Physics and chemistry of peat: A textbook for universities. Moscow: Nedra, 1989. 303 p. (in Russian).
- Markova E.V., Lazarev A.B. Features of the morphology of vegetative shoots of *Urtica dioica* L. Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences. 2010. No. 15(86). P. 34–39. (in Russian).
- Nazaryuk V.M. Balance and transformation of nitrogen in agroecosystems. Novosibirsk: SB RAS Publishing House, 2002. 257 p. (in Russian).
- Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Kur'ina I.V., Kurganova I.N. Decomposition rate of peat-forming plants in oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia: assessment of the effect of water table level and peat deposit temperature. Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1101–1111. <https://doi.org/10.1134/S1064229319090060>
- Pansu M., Gotheru J. Soil analysis: Mineralogical, organic and inorganic analysis methods / Translated from the 2nd English edition edited by D.A. Pankratov. St. Petersburg: Profession, 2014. 800 p. (in Russian).
- Pashenova N.V., Kabilov M.R., Kerchev I.A. Ophiostomatoid fungi carried by the allied bark beetle in the Tomsk region. In book: Problems of forest phytopathology and mycology. Proceedings of the XI international conference (Petrozavodsk, 10–14 October, 2022). Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. 2022. P. 51–53. (in Russian).
- Ponomarev A.Y. Influence of pH on the ability of pollutants to move in soil. In book: The role and place of information technologies in modern science. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. The Role and Place of Information Technologies in Modern Science: Collection of Articles from the International Scientific and Practical Conference (Saransk, 3 February, 2016) / Editor-in-Chief Asatur Albertovich Sukiasyan. Vol. 2. Saransk: OMEGA SCIENCES, 2016. P. 242–244. (in Russian).
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Y.D. Assessment of intra-biogeocenotic variability of forest litters and dwarf shrub–herbaceous vegetation in spruce stands. Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53. No. 1. P. 27–38. <http://dx.doi.org/10.1134/S1064229320010135>
- Sokolov I.A. Theoretical problems of genetic soil science. Novosibirsk: Humanitarian Technologies, 2004. 288 p. (in Russian).
- Spirina V.Z., Solovyova T.P. Agrochemical methods of studying soils, plants and fertilizers: textbook. Tomsk: Tomsk State University Publishing House, 2014. 336 p. (in Russian).

- Monitoring Technologies for Fir Forests in the Ussuri Polygraph Invasion Zone in Siberia. A Methodological Guide. Tomsk: UMNIUM, 2018. 74 p. (in Russian).
- Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Litter in forests and grasslands / ed. E.F. Vedrova. Novosibirsk: SB RAS Publishing House, 2012. 134 p. (in Russian).
- Torzhkov I.O., Konstantinov A.V., Koroleva T.S., Kushnir E.A., Efimov S.V., Shkolnik I.M. Assessment of future climate change impacts on forestry in Russia. Russian Meteorology and Hydrology. 2019. Vol. 44. No. 3. P. 180–186. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068373919030038>
- Ushanova V.M., Lebedeva O.I., Repyakh S.M. Study of the influence of growth conditions on the chemical composition of stinging nettle (*Urtica dioica* L.). Khimija rastitel'nogo syr'ja. 2001. No. 3. P. 97–104. (in Russian).
- Fedorets N.G., Bakhmet O.N. Ecological features of transformation of carbon and nitrogen compounds in forest soils. Petrozavodsk: Karelian Research Center of RAS, 2003. 240 p. (in Russian).
- Shein E.V. Theories and methods of soil physics: Collective monograph / Ed. by E.V. Shein and L.O. Karpachevsky. Moscow: «Grif i K», 2007. 616 p. (in Russian).
- Shirina L.V. Plant introduction as a way of spreading of the invasive organisms on forest woody plants. In book: Current issues of biodiversity conservation and sustainability of natural and artificial plant communities: Proceedings of the All-Russian youth scientific and practical conference (Voronezh, 27 April, 2023) / Ed. Yu.V. Chekmeneva. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2023. p. 87–92. (in Russian). https://doi.org/10.58168/CCIBSNAPC_87-92
- Shurkina V.V. Changes in the stock and fractional composition of forest litter in cedar forests affected by the six-toothed bark beetle (Maly Abakan site of the Khakassky Nature Reserve). Advances in Current Natural Sciences. 2019. No. 3–1. P. 40–45. (in Russian).
- Allen E., Banfield J. Community genomics in microbial ecology and evolution. Nature Reviews Microbiology. 2005. No. 3. P. 489–498. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1157>
- Aponte C., Garcia L., Maranon T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence. Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 309. P. 36–46. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2013.05.035>
- Brouillard B.M., Mikkelsen K.M., Bokman C.M., Berryman E.M., Sharp J.O. Extent of localized tree mortality influences soil biogeochemical response in a beetle-infested coniferous forest. Soil Biology and Biochemistry. 2017. Vol. 114. P. 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.06.016>
- Chapman S.K., Hart S.C., Cobb N.S., Whitham T.G., Koch G.W. Insect herbivory increases litter quality and decomposition: an extension of the acceleration hypothesis. Ecology. 2023. Vol. 84. No. 11. P. 2867–2876. <https://doi.org/10.1890/02-0046>
- Cobb R.C., Orwig D.A., Currie S. Decomposition of green foliage in eastern hemlock forests of southern New England impacted by hemlock woolly adelgid infestations. Canadian Journal of Forest Research. 2003. Vol. 36. No. 5. P. 1331–1341. <https://doi.org/10.1139/X06-012>
- Dupuy J.M., Chazdon R.L. Interacting effects of canopy gap, understory vegetation and leaf litter on tree seedling recruitment and composition in tropical secondary forests. Forest Ecology and Management. 2008. Vol. 255. No. 11. P. 3716–3725. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.021>
- Findlay S., Carreiro M., Kruschick V., Jones C.G. Effects of damage to living plants on leaf litter quality Ecological Applications. 1996. Vol. 6. No. 1. P. 269–275. <https://doi.org/10.2307/2269570>
- Frost P., Evans-White M., Finkel Z., Jensen T., Matzek V. Are you what you eat? Physiological constraints on organismal stoichiometry in an elementally imbalanced world. Oikos. 2005. Vol. 109. No. 1. P. 18–28. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.14049.x>
- Hunter M.D. Insect population dynamics meets ecosystem ecology: effects of herbivory on soil nutrient dynamics. Agricultural & Forest Entomology. 2001. Vol. 3. No. 2. P. 77–84. <https://doi.org/10.1046/j.1461-9563.2001.00100.x>
- Kerchev I.A., Mandelshtam M.Yu., Krivets S.A., Ilinsky Yu.Yu. Small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichhof, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): a new alien species in West Siberia. Entomological Review. 2019. Vol. 99. No. 5. P. 639–644. <https://doi.org/10.1134/S0013873819050075>
- Kerchev I.A., Bisirova E.M., Smirnov N.A., Grachev I.G., Nikiforov A.N., Kalashnikova D.A. Effects of an Invasive Bark Beetle Polygraphus proximus Blandf. Outbreak on Carbon Pool Dynamics in West Siberian Dark Coniferous Forests. Forests. 2024. Vol. 15. No. 3. P. 542. <https://doi.org/10.3390/f15030542>

- Liu C., Liu Y., Guo K., Zhao H., Qiao X., Wang S., Zhang L., Cai X. Mixing litter from deciduous and evergreen trees enhances decomposition in a subtropical karst forest in southwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*. 2016. Vol. 101. P. 44–54. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3077-9>
- Moore T., Trofymow J., Prescott C., Titus B. Can short-term litter-bag measurements predict long-term decomposition in northern forests? *Plant and soil*. 2017. Vol. 416. No. 1. P. 419–426. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3228-7>
- Sariyildiz T., Akkuzu E., Küçük M., Duman A., Aksu Y. Effects of *Ips typographus* (L.) damage on litter quality and decomposition rates of oriental spruce [*Picea orientalis* (L.) Link.] in Hatila Valley National Park, Turkey. *European Journal of Forest Research*. 2008. Vol. 127. P. 429–440. <https://doi.org/10.1007/s10342-008-0226-6>
- Sayer E. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*. 2006. Vol. 81. No. 1. P. 1–31. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006846>
- Skelton J., Jusino M., Carlson P., Smith K., Banik M., Lindner D., Palmer J., Hulcr J. Relationships among wood-boring beetles, fungi, and the decomposition of forest biomass. *Molecular Ecology*. 2019. Vol. 28. No. 22. P. 4971–4986. <https://doi.org/10.1111/mec.15263>
- Skelton J., Loyd A., Smith J., Blanchette R., Held B., Hulcr J. Fungal symbionts of bark and ambrosia beetles can suppress decomposition of pine sapwood by competing with wood-decay fungi. *Fungal Ecology*. 2020. Vol. 45. P. 100926. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2020.100926>
- Štursová M., Šnajdr J., Cajthaml T., Bárta J., Šantrůčková H., Baldrian P. When the forest dies: the response of forest soil fungi to a bark beetle-induced tree dieback. *The ISME journal*. 2014. Vol. 8. No. 9. P. 1920–1931. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.37>
- Throop H.L., Abu Salem M., Whitford W.G. Fire enhances litter decomposition and reduces vegetation cover influences on decomposition in a dry woodland. *Plant Ecology*. 2017. Vol. 218. No. 7. P. 799–811. <https://doi.org/10.1007/s11258-017-0730-1>
- Yavitt J.B., Williams C.G. Conifer litter identity regulates anaerobic microbial activity in wetland soils via variation in leaf litter chemical composition. *Geoderma*. 2015. Vol. 243. P. 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.023>
- Wardle D.A., Nilsson M.C., Zackrisson O., Gallet C. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. Vol. 35. No. 6. P. 827–835. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00118-4)

Received 05 December 2025

Accepted 20 January 2026

Published 03 February 2026

About the authors:

Artem N. Nikiforov – Junior Researcher at the Laboratory of Terrestrial Ecosystems Carbon Balance Monitoring, Institute of Climate and Ecological Systems Monitoring, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); a.nik-n@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0000-3273-9043>

Liliya G. Nikonova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Terrestrial Ecosystems Carbon Balance Monitoring, Institute of Climate and Ecological Systems Monitoring, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); Lili12358@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1759-5082>

Anastasia E. Zelentsova – Junior Researcher at the Laboratory of Terrestrial Ecosystems Carbon Balance Monitoring, Institute of Climate and Ecological Systems Monitoring, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); nastya_zel@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0009-5992-9635>

Yulia V. Zubareva – Engineer at the Laboratory of Terrestrial Ecosystems Carbon Balance Monitoring, Institute of Climate and Ecological Systems Monitoring, (Tomsk, Russia); ulia_zubareva2509@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0586-9380>

Anastasia A. Manole – Engineer at the Laboratory of Terrestrial Ecosystems Carbon Balance Monitoring, Institute of Climate and Ecological Systems Monitoring, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); matyukhina_nastya08@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3964-2444>

The authors read and approved the final manuscript



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