

УДК 630*114.351

ВЛИЯНИЕ ТИПА ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА РАЗЛОЖЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЗОНЕ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

СУСЛОПАРОВА ЕЛИЗАВЕТА СТАНИСЛАВОВНАвагистрант 2 курса, направления 35.04.03 Агрехимия и агропочвоведение
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»**Научный руководитель: Пилецкая Ольга Андреевна**канд. биол. наук, доцент кафедры экологии, почвоведения и агрохимии
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Аннотация: Разложение является важной частью углеродного цикла, этот процесс по-разному протекает в естественных и антропогенно-преобразованных экосистемах. В условиях южной тайги Дальнего Востока России изучено влияние типа землепользования (естественный лес и пашня) на процесс разложения легко- и трудноразлагаемого опада методом индекса чайного пакета (ТБИ). Установлено что разложение легко- и трудноразлагаемого опада протекает с одинаковой скоростью и не зависит от условий среды. При этом трудноразлагаемый опад в условиях пашни разлагался быстрее чем в лесу. Выявлена взаимосвязь скорости разложения с температурой и влажностью, рН, содержанием водорастворимого азота и плотностью сложения почвы. Установлено, что перевод лесов в пашню приводит к ускорению разложения трудноразлагаемого опада, однако не влияет на стабилизацию органического вещества в ходе разложения.

Ключевые слова: разложение опада, органическое вещество, опад, биоценоз, землепользование, зеленый чай, ройбуш.

EFFECTS OF LAND - USE TYPE ON DECOMPOSITION OF ORGANIC MATTER IN THE SOUTHERN TAIGA ZONE OF THE FAR EAST OF RUSSIA

Susloparova Elizaveta Susloparova*Scientific adviser: Piletskaya Olga Andreevna*

Abstract: Decomposition is an important part of the carbon cycle, this process proceeds differently in natural and anthropogenically transformed ecosystems. In the southern taiga of the Russian Far East, we studied the effect of land use (natural forest and cropland) on the decomposition of easily and hardly decomposed litter using the Tea Bag Index (TBI) method. It was found that the decomposition of easily decomposed litter proceeds with the same rate and does not affect the environmental parameters. At the same time, hard decomposable litter decomposed faster in cropland than in the forest. The relationship of decomposition rate with temperature and humidity, pH, water-soluble nitrogen content, and bulk density was found. It was found that conversion of forests to cropland to acceleration of decomposition of hard-to-decompose litter, but does not affect the stabilization of organic matter during decomposition.

Key words: litter decomposition, organic matter, biocoenosis, land-use, green tea, rooibos.

Актуальность. Разложение органического вещества является важной частью углеродного цикла естественных экосистем [1, с. 1005], [2, с. 152], [3, с. 134]. В ходе разложения часть органического вещества минерализуется, а другая – стабилизируется в форме устойчивых гумусовых веществ. При нарушениях целостности экосистем, например, сведении лесов и формировании на их месте агроэкосистем разрушаются многие свойства и функции экосистем, среди которых и разложение опада. Так, в агроэкосистемах при обработке почв разрушаются почвенные агрегаты, повышается температура и аэрация почвы, и высвобождается органическое вещество, которое было защищено в физических структурах [4, с. 48-49], [5, с. 1356]. На разложение опада влияют климатические условия [6, с. 112], [7, с. 1069-1067], сообщества разлагателей, кислотность почв и качественные характеристики опада, но влияние этих факторов различается в разных экосистемах [8, с. 827]. Так, в исследованиях Е. Е. Bontti с соавторами [9, с. 1360] на лугах в умеренных биомах не было выявлено значимого влияния климатических условий на разложение опада, в глобальных исследованиях влияние температуры и влажности были главными лимитирующими факторами [1, с. 1015], [10, с. 1049], [11, с. 2513].

Известно, что качество растительного материала влияет на процесс разложения [1, с. 1015]. Метод TBI (tea bag index) является инновационным, стандартизированным и недорогим способом оценки разложения опада, который измеряет разложение органического вещества с помощью двух типов органического материала (зеленый чай и ройбуш) [12, с. 175], [13, с. 1073-1074], [14, с. 1345]. Метод, предложенный J. A. Keuskamp с соавторами [13, с. 1072], позволяет сравнивать процесс разложения между различными биомами, экосистемами и типами почв с помощью основных параметров: фактора стабилизации (S) и константы скорости разложения (k).

В бореальной зоне Дальнего Востока России исследования по изучению разложения местного опада и факторов, влияющих на этот процесс немногочисленны [15, с. 890], [16, с. 74]. Подобные исследования в агроландшафтах данного региона не проводились. Метод индекса чайного пакета (TBI) является стандартизированным и позволяет избегать эффекта «домашнего поля», когда закладываются мешочки с местным опадом. Ранее этот метод не был использован для оценки разложения органического вещества в условиях бореального пояса России. Целью исследования являлось определение факторов, влияющие на процессы разложения под воздействием разного типа землепользования (ненарушенный лес и пашня) в условиях южной тайги Дальнего Востока России с использованием метода TBI.

Материал и методы исследований. Исследования проводились с июня по октябрь 2020 года на пашне и в естественном ненарушенном лесу на севере Амурской области. Одна площадка была заложена в лиственничнике в пределах особо охраняемой природной территории Зейского заповедника, который, по международной классификации МСОП (IUCN), отнесён к типу «строгий резерват». Эта территория находится в зоне лиственничных лесов с естественным ходом биохимических процессов. Вторая площадка заложена на пашне вблизи ненарушенного леса в сходных геоморфологических условиях и на аналогичном типе почв. С 2006 года территория используется для выращивания однолетних культур (овощи, картофель).

Параметры почв изучаемых площадок статистически значимо различались (табл. 1). Так, почва на пашне по сравнению с лесом имела более высокую (в 1,5 раза) среднюю за период исследования температуру, а влажность была ниже на 10 % по сравнению с лесной площадкой (рис. 1). Лесная почва характеризуется слабокислой реакцией среды, а почвы пашни – нейтральной. В лесной почве выше содержание водорастворимого углерода, ниже плотность сложения и содержание водорастворимого азота.

В качестве материала для изучения разложения органического вещества были взяты нетканые коммерческие чайные мешочки фирмы Lipton зеленый чай (EAN 87 14100 77054 2) и чай ройбуш (EAN 87 22700 18843 8). Ширина между ткаными нитями составляет 0,25 мм, которые не позволяют проникнуть внутрь макрофауне. Перед закладкой чайных пакетов, они были взвешены, включая пакетик, шнур и лейбл. На каждой площадке было рандомизировано заложено по 10 штук чая двух видов (n=40) с подписанными номерами на лейбле, на глубину до 8 см в соответствии с методикой.

Таблица 1

Характеристика почв на изучаемых площадках*

Параметры	Лес	Пашня
Плотность сложения г/см ³	0,2±0,05 ^a	0,8±0,02 ^b
Почвенная температура (°С)	10,3±0,36 ^a	15,6±0,47 ^b
Почвенная влажность (%)	36,6±2,48 ^a	26,01±0,73 ^b
Кислотность почвы (рН) Н ₂ О	5,3±0,06 ^a	7,6±0,02 ^b
Общий углерод (С %)	8,2±2,5 ^a	6,1±0,51 ^a
Водорастворимый углерод мг/л (DOC)	43,9±4,35 ^a	35,3±2,0 ^b
Водорастворимый азот мг/л (DON)	1,1±0,17 ^a	3,9±0,4 ^b

Примечание: * – данные в таблице представлены средними величинами со стандартными ошибками. Латинскими буквами (a, b) отмечены значимо различающиеся величины по результатам дисперсионного анализа ($p < 0,05$).

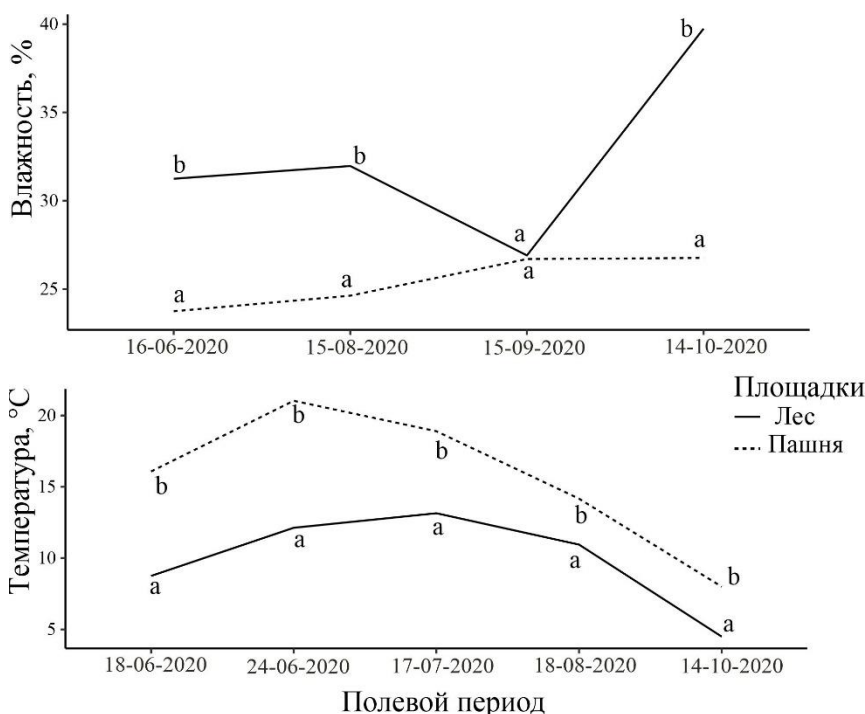


Рис. 1. Сезонная динамика температуры и влажности почв. Каждая точка на графике отражает среднее значение из 10 индивидуальных измерений. Строчными латинскими буквами (a, b, c) указаны значимые различия между площадками ($p < 0,05$)

Для исследования химических и физико-химических свойств почвы цилиндром были отобраны образцы на глубине 0-10 см. После стандартной подготовки в них были определены: содержание общего и водорастворимого углерода и азота методом сжигания пробы в струе кислорода на элементном анализаторе Shimadzu TOC-L CSN, актуальная кислотность почвы $pH_{вод}$ – потенциометрическим методом по ГОСТ 26212-91. Аналитические исследования проводились на базе Аналитического центра минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН. Для наблюдения за температурой почв в течение эксперимента рядом с чайными мешочками на каждой площадке закладывались автономные регистраторы температуры (Tibdit UTBI-001(Oneset Corp., США), которые фиксировали температуру почв каждый час. Данные с регистраторов усредняли и сравнивали среднесуточную температуру почв. Для наблюдения за почвенной влажностью в середине каждого месяца проводились отборы почвенных образцов (июнь, август, сентябрь, октябрь).

Чайные мешочки были извлечены через 120 дней. С мешочков были удалены частички почвы и

корни, после этого их взвешивали во влажном состоянии. Чайные мешочки помещали в сушильный шкаф на 48 часов при 70°C. В методике J. A. Keuskamp [13, с. 1072] рекомендовано увеличить срок инкубации в зоне бореальных лесов, так как в них разложение происходит медленнее из-за низких температурных условий, и значение скорости разложения (k) может быть низким, в то время как стабилизирующий фактор (S) будет высоким, при этом зеленый чай может не достичь своего предельного значения в разложении. Поэтому мы продлили инкубационный период с 90 дней до 120.

Потеря массы чая, скорость разложения (k) и фактор стабилизации (S) были рассчитаны в соответствии с методикой [13, с. 1072-1073].

Результаты лабораторных анализов и данные полевых измерений обработаны методами математической статистики в программе R Studio версия 3.3.2 [17]. Статистические различия между исследуемыми биоценозами установлены при помощи однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Для определения зависимости между потерей массы и условиями окружающей среды были рассчитаны корреляционные уравнения с уровнем статистической значимости p -value $< 0,05$.

Результаты и их обсуждение. За изучаемый период потеря массы имела значимые статистические различия между двумя видами чая (p -value $< 0,05$) (рис. 2). Установлено, что скорость разложения зеленого чая была в 2 раза быстрее (в среднем 66%), чем чая ройбуш (в среднем 34%). Потеря массы зеленого чая в лесу составила 66%, на пашне 66%. Между двумя площадками по зеленому чаю не было выявлено статистически значимой разницы (p -value = 1). Потеря массы чая ройбуш на пашне в 1,4 раза больше, чем в ненарушенном лесу – 41% и 28% соответственно) (p -value $< 0,05$) (табл. 2).

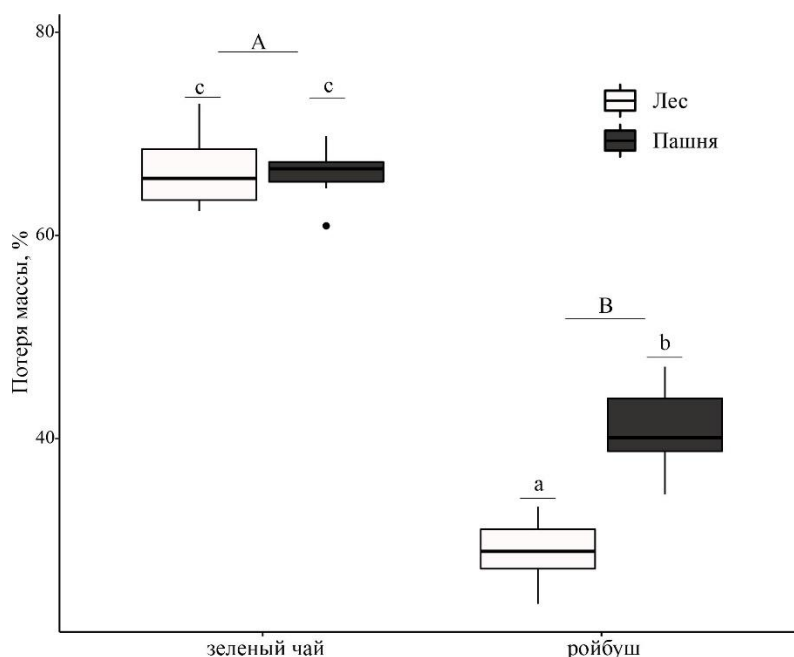


Рис. 2. Потеря массы зеленого чая и чая ройбуш в лесу и на пашне. Прописными латинскими буквами (A, B) указаны значимые различия между видами чая, строчными (a, b, c) отмечены различия между площадками ($p < 0,05$)

На скорость разложения органического вещества влияет качество растительного материала [18, с. 134], [12, с. 175-176], [19, с. 1370]. Зеленый чай по химическому составу эквивалентен опад широколиственных лесов, в котором содержится больше легкоразлагаемых веществ, по сравнению с чаем ройбуш, таких как: жиры, воски, простые сахара и целлюлоза. В свою очередь, чай ройбуш схож с опадом хвойных лесов и имеет в своем составе большее содержание лигнина. Лигнин является одним из трудно разлагаемых веществ для почвенной биоты [18, с. 140]. Исследование раннего разложения на региональном уровне показали отсутствие значимого влияния типа землепользования (в том числе сельскохозяйственного) на потерю массы двух видов субстратов [19, с. 1380]. Мы показали, что в локальных исследованиях, в северных широтах тип землепользования значимо повлиял на раннее разложение трудно разлагаемого

опада (p -value $< 0,05$) (рис. 2). По нашему мнению, это влияние может быть более выраженным на поздних этапах разложения. Так как на ранних этапах разложения минерализация лабильных соединений углерода осуществляется многими группами микроорганизмов, в то время как на более поздней стадии разложения разлагатели могут стать более избирательными из-за увеличения сложности субстрата, что в свою очередь может привести к различиям в потере массы подстилки между типами земледользования [19, с. 1390], [20, с. 530].

В наших исследованиях не было выявлено значимых взаимосвязей между потерей массы зеленого чая на двух изучаемых площадках с условиями окружающей среды (p -value $> 0,05$), в то время как потеря массы чая ройбуш коррелировала с почвенно-климатическими условиями. Так, тесная положительная корреляционная связь потери массы чая ройбуш была выявлена с почвенной температурой ($R=0,91$), плотностью сложения ($R=0,89$), содержанием водорастворимого азота ($R=0,74$) и кислотностью почвы ($R=0,93$), отрицательная корреляция прослеживается с почвенной влажностью ($R=-0,83$) (p -value $< 0,05$) (рис. 3).

Основные факторы, которые могут оказывать влияние на разложение на локальном уровне – температура почвы [21, с. 520], влажность [22, с. 509], доступность питательных веществ [23, с. 296], кислотность почвы [24] и плотность сложения [25, с. 30]. Скорость разложения подстилки обусловлена в основном деятельностью микроорганизмов, в значительной степени зависящих от температуры [26], [11, с. 2513], [27, с. 191]. Согласно литературным данным, прямое влияние температуры на разложение двух видов чая сильно зависит от природной зоны. Например, положительная связь между температурой и потерей массы чайных мешочков установлена в лесу умеренной зоны в Австрийских Альпах на локальном уровне [28, с. 501-502]. I. Djukić с соавторами [19, с. 1380-1381] не обнаружили никакой связи между факторами среды в разных биомах (от арктических до засушливых субтропических). В исследованиях Bontti с соавторами [9, с. 1358-1360] было установлено что в умеренной зоне на лугах ни один из климатических показателей не влиял на скорость разложения опада. Возможно, это связано с тем, что влияние температуры на скорость разложения зависит от уровня влажности почвы [1, с. 1016]. Так же, в литературных источниках показано, что в кислых и влажных почвах разложение происходит быстрее, так как высокая кислотность почв способствует росту и активности бактерий по сравнению с гифами грибов [29, с. 120].

Обработка почвы при переводе лесов в земли сельскохозяйственного назначения приводит к разрушению почвенных агрегатов, повышению температуры и аэрации почв, высвобождению органического вещества, которое было защищено до этого в почвенных агрегатах, увеличению плотности сложения [4, с. 48], [5, с. 1356]. Органическое вещество почвы становится более доступным для почвенных организмов, увеличивается выброс углекислого газа (CO_2) и уменьшается количество лабильной фракции.

В нашем локальном исследовании в бореальной зоне не было обнаружено статистически значимого влияния температуры и влажности на зеленый чай, тогда как потеря массы чая ройбуш зависела от почвенных свойств. Более быстрое разложение чая ройбуш на пашне по сравнению с лесом могло быть вызвано щелочной реакцией среды, которая способствует росту микромицетов, специфичных для разложения трудноразлагаемых веществ. Водорастворимые фракции органического материала являются источником углерода и азота для микроорганизмов, т.к. только в растворенном состоянии происходит диффузия субстрата [23, с. 296]. Трудно разлагаемый опад характеризуется меньшим содержанием азота по сравнению с легкоразлагаемым [13, с. 1072] и микробное сообщество, испытывая дефицит азота может потреблять его из окружающей почвенной среды. В наших исследованиях повышенное содержание водорастворимого азота на пашне по сравнению с лесом может объяснять ускорение разложения трудноразлагаемого опада (чай ройбуш) (табл. 2, рис. 3).

Физические свойства почв, такие как плотность сложения, могут влиять на скорость разложения наземного опада и корней, снижая потерю массы [30, с. 34], [25, с. 30]. В нашем исследовании наблюдается повышение скорости разложения трудно разлагаемых веществ при плотности сложения на пашне $0,8 \text{ г/см}^3$. В лесу при плотности сложения равной $0,2 \text{ г/см}^3$, данной взаимосвязи не было обнаружено.

Таблица 2

Потеря массы зеленого чая и чая ройбуш, фактор стабилизации (S) и константа скорости разложения (k)

Площадка	Потеря массы зеленого чая	Потеря массы чая ройбуш	S	k
Лес	66.40 ± 1.10 ^c	28.84 ± 0.92 ^a	0.19 ± 0.01 ^a	0.03 ± 0.004 ^a
Пашня	66.16 ± 0.74 ^c	41.07 ± 1.21 ^b	0.19 ± 0.008 ^a	0.17 ± 0.02 ^b

Примечание: * – каждое значение представляет собой среднее и ±se из 10 индивидуальных измерений. Строчными (a, b) отмечены различия ($p < 0.05$) в пределах столбцов.

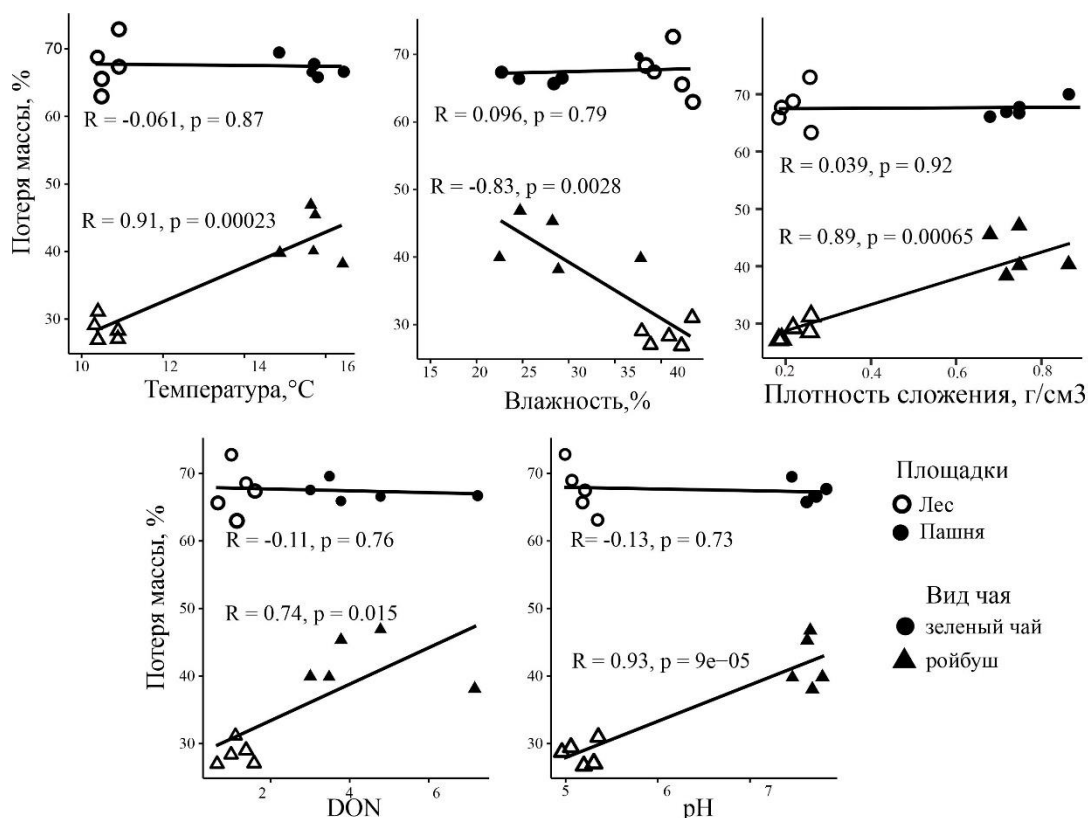


Рис. 3. Взаимосвязь потери массы с условиями окружающей среды и почвенными свойствами. На графиках указаны коэффициенты корреляции и их значимость (R, p-value) ($p < 0,05$)

В соответствии с методикой J. A. Keuskamp [13, с. 1072-1073] рассчитаны: фактор стабилизации (S) и константа скорости разложения (k). Под стабилизацией органического вещества в почве понимают повышение его устойчивости к биотическим и абиотическим воздействиям с увеличением времени его оборачиваемости [31, с. 647]. Константа разложения k рассчитывается на основе потери массы ройбуш с использованием экспоненциальной модели разложения. Если k можно оценить только на ранних стадиях разложения (т.е. по данным чая ройбуш через три месяца), то S связан с предельным значением и может быть оценен после разложения большей части лабильного материала зеленого чая.

Низкие значения S указывают на большее разложение лабильной фракции [13, с. 1073]. Высокие доли потери массы ройбуш вызывают более высокие начальные скорости разложения (k), что приводит к более быстрому разложению [13, с. 1072], [32, с. 60], [14, с. 1340]. Значения S, полученные в нашем исследовании, показали, что полное разложение лабильной фракции зеленого чая значимо не отличалось между двумя изучаемыми площадками (табл. 2). Скорость высвобождения лабильных веществ (k) на пашне была значимо выше, чем в лесу (p -value < 0.05).

Для определения взаимосвязи показателей S и k с условиями окружающей среды были рассчитаны корреляционные уравнения (p -value $< 0,05$). В нашем эксперименте фактор стабилизации (S) не

зависел от почвенных условий. Это объясняется тем, что изученные условия среды на двух исследуемых площадках не лимитируют стабилизацию органического вещества. На константу скорости разложения (k), как и на потерю массы чая ройбуш, повлияли основные химические и физико-химические свойства почв (рис. 4). Сильная положительная корреляционная связь со скоростью разложения (k) была выявлена с температурой ($R=0,74$), плотностью сложения ($R=0,71$) и кислотностью почвы ($R=0,76$) при p -value $<0,05$. Средняя отрицательная корреляционная связь со скоростью разложения наблюдается с влажностью почвы ($R= -0,67$).

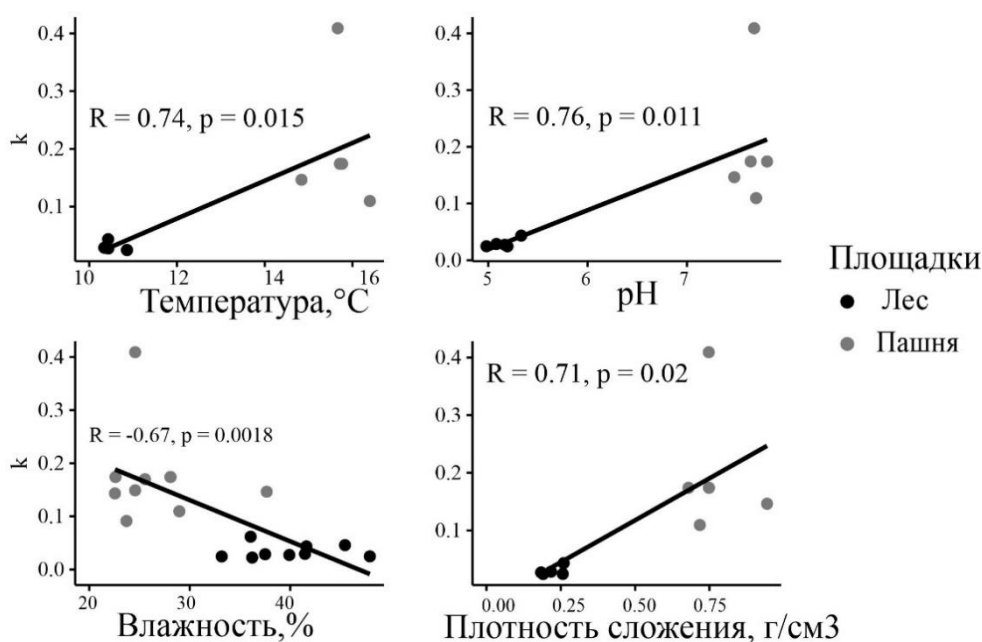


Рис. 4. Множественные сравнения между константой скорости разложения и условиями окружающей среды, и почвенными свойствами

В нашем локальном исследовании, проведенном в одной климатической зоне, не установлено значимое влияние почвенных характеристик на фактор стабилизации S . Вероятно данный показатель является более чувствительной характеристикой для региональных исследований. Так, показано, что в глобальных исследованиях в разных климатических зонах фактор стабилизации (S) снижается с повышением температуры и влажности почвы, причем влияние этих двух переменных является аддитивным – т.е. температура оказывала одинаковое влияние на почвы, относящиеся к разным классам влажности [27, с. 190].

Заключение

Таким образом, наше исследование показывает, что на потерю массы влияет качество опада и тип землепользования. Перевод лесов в пашню приводит к ускорению разложения трудноразлагаемых фракций опада, повышению почвенной температуры, снижению почвенной влажности, смещению кислотности почв в сторону щелочной реакции среды, увеличению плотности сложения и содержания водорастворимого азота. Несмотря на контрастность почвенно-климатических условий леса и пашни, разложение легкоразлагаемого опада на них протекало одинаково. На ускорение разложения трудноразлагаемого опада повлияла почвенная температура, влажность, плотность сложения, pH и содержание водорастворимого азота.

На раннем этапе разложения не было выявлено факторов, лимитирующих стабилизацию лабильных веществ почвы, стабилизация органического вещества не зависела от типа землепользования. При повышении скорости разложения органического вещества при переводе лесных экосистем в сельскохозяйственные может происходить большая эмиссия углекислого газа и значительное обеднение почв валовыми формами углерода.

Список литературы

1. Fanin N. Relative Importance of Climate, Soil and Plant Functional Traits During the Early Decomposition Stage of Standardized Litter / N. Fanin, S. Bezaud, J. M. J. Sarneel, S. Cecchini, M. Nicolas, L. Augusto // *Ecosystems*. – 2020. – V. 23. – P. 1004-1018.
2. Moorhead D. L. A theoretical model of litter decay and microbial interaction / D. L. Moorhead // *Ecological Monographs*. – 2006. – V. 76. – P. 151-174.
3. Prescott C. E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils / C. E. Prescott // *Biogeochemistry*. – 2010. – V. 101. – P. 133-149.
4. Bongiorno G. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe / G. Bongiorno, E. K. Bünemann, C. U. Oguejiofora, J. Meier, G. Gort, R. Comans, P. Mäder, L. Brussaard, R. de Goede // *Ecological Indicators*. – 2019. – V. 99. – P. 38-50.
5. Six J. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems / J. Six, T. Elliott, K. Paustian // *Soil Science Society of America Journal*. – 1999. – V. 63; Iss. 5. – P. 1350-1358.
6. Cornelissen J. H. C. Functional leaf attributes predict litter decomposition rate in herbaceous plants / J. H. C. Cornelissen // *New Phytologist*. – 1997. – V. 13. – P. 109-114.
7. Cornwell W. K. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide / W. K. Cornwell, J. H. C. Cornelissen, K. Amatangelo, E. Dorrepaal, V. T. Eviner, O. Godoy // *Ecology Letters*. – 2008. – V. 11. – P. 1065-1071.
8. García-Palacios P. The importance of litter traits and decomposers for litter decomposition: a comparison of aquatic and terrestrial ecosystems within and across biomes / P. García-Palacios, B. G. McKie, I. T. Handa, A. Frainer, S. Hättenschwiler // *Functional Ecology*. – 2016. – V. 30. – P. 819-829.
9. Bontti E. E. Litter decomposition in grasslands of Central North America (US Great Plains) / E. E. Bontti, J. P. Decant, S. M. Munson, M. A. Gathany, A. Przeszlowska, M. L. Haddix, S. Owens, I. C. Burke, W. J. Parton, M. E. Harmons // *Glob Change Biol*. – 2009. – V. 15. – P. 1356-1363.
10. García-Palacios P. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes / P. García-Palacios, F. T. Maestre, J. Kattge, D. H. Wall // *Ecology Letters*. – 2013. – V. 16(8). – P. 1045-1053.
11. Kirschbaum U. F. The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate / U. F. Kirschbaum // *Soil Biol Biochem*. – 2006. – V. 38(9). – P. 2510-2518.
12. Didion M. Towards Harmonizing Leaf Litter Decomposition Studies Using Standard Tea Bags—A Field Study and Model Application / M. Didion, A. Repo // *Forests*. – 2016. – V. 7. – P. 167-179.
13. Keuskamp J. A. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems / J. A. Keuskamp, J. J. Dingemans // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2013. – V. 4. – P. 1070-1075.
14. Sofo A. Structural and Functional Organization of the Root System: A Comparative Study on Five Plant Species Plants / A. Sofo, H. S. Elshafie, I. Camele // *Plants*. – 2020. – V. 9. – P. 1338-1350.
15. Bryanin S. Litter Decomposition and Nutrient Dynamics in Fire-Affected Larch Forests in the Russian Far East / S. Bryanin, A. Kondratova, E. Abramova // *Forest*. – 2020. – V. 11(8). – P. 882-897.
16. Абрамова, Е. Р. Разложение опада в постпирогенных лиственничниках хребта Тукурингра (верхнее Приамурье) / Е. Р. Абрамова, С. В. Брянин, А. В. Кондратова // *Сибирский лесной журнал*. – 2018. – № 2. – С. 71-77.
17. R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – URL: <http://www.R-project.org/> (28.04.2021).
18. Berg B. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality / B. Berg, M. P. Berg, P. Bottner, E. Box, A. Breymeyer, R. C. Anta // *Biogeochemistry*. – 1993. – V. 20. – P. 127-159.
19. Djukic I. Early stage litter decomposition across biomes / I. Djukic, S. Kepfer-Rojas // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 626. – P. 1369–1394.

20. McGuire K. L. Microbial communities and their relevance for ecosystem models: decomposition as a case study / K. L. McGuire, K. K. Treseder // *Soil Biol. Biochem.* – 2010. – V. 42 (4). – P. 529-535.
21. Hobbie S. E. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra / S. E. Hobbie // *Ecological Monographs.* – 1996. – V. 66, № 4. – P. 503-522.
22. Robinson C. H. The response of plant litter decomposition and nitrogen mineralization to simulated environmental change in a high Arctic polar desert and subarctic dwarf shrub heath / C. H. Robinson, P. A. Wookey, A. N. Parsons, J. A. Potter, T. V. Callaghan, J. A. Lee, M. C. Press, J. M. Welker // *Oikos.* – 1995. – V. 74. – P. 503-512.
23. Токарева И. В. Динамика содержания водорастворимого органического углерода и эмиссии CO₂ / И. В. Токарева, О. В. Мясгина // *Хвойные бореальные зоны.* – 2011. – № 3-4. – С. 294-298.
24. Swift M. J. Decomposition in terrestrial ecosystems [Электронный ресурс] / M. J. Swift, O. W. Heal, J. M. Anderson, J. Anderson // Berkeley: Univ. of California Press. – 1979. – Режим доступа: – URL: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US8108702> (06.05.2021).
25. Ilek A. I. The effect of the bulk density and the decomposition index of organic matter on the water storage capacity of the surface layers of forest soils / A. I. Ilek, A. J. Kucza, M. Szostekb // *Geoderma.* – 2017. – V. 285. – P. 27-34.
26. Davidson E. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [Электронный ресурс] / E. A. Davidson, I. A. Janssens // *Nature.* – 2006. – V. 440. – Режим доступа: – URL: <https://doi.org/10.1038/nature04514> (05.05.2021).
27. Petraglia A. Litter decomposition: effects of temperature driven by soil moisture and vegetation type / A. Petraglia, C. Cacciatori, S. Chelli, G. Fenu, G. Calderisi, D. Gargano, T. Abeli, S. Orsenigo, M. Carbognani // *Plant Soil.* – 2019. – V. 435. – P. 187-200.
28. Mayer M. Tree regeneration retards decomposition in a temperate mountain soil after forest gap disturbance / M. Mayer, B. Matthews, C. Rosinger, H. Sandren, D. L. Godbold, K. Katzensteiner // *Soil Biology and Biochemistry.* – 2017. – V. 115. – P. 490-508.
29. Hobbie S. E. Litter decomposition in moist acidic and non-acidic tundra with different glacial histories / S. E. Hobbie, L. Gough // *Oecologia.* – 2004. – V. 140; Iss. 1. – P. 113-124.
30. Carlesso L. Soil compaction effects on litter decomposition in an arable field: Implications for management of crop residues and headlands / L. Carlesso, A. Beadleb, S. M. Cooks, J. Evansc, G. Hartwelld, K. Ritze, D. Sparkese, L. Wua, P. J. Murraya // *Applied Soil Ecology.* – 2019. – V. 134. – P. 31-37.
31. Курганова И. Н. Климат и землепользование как ключевые факторы стабильности органического вещества в почвах / И. Н. Курганова, В. М. Семенов, В. Н. Кудеяров // *Доклады академии наук.* – 2019. – Том 489, № 6. – С. 646-650.
32. Sarneel J. M. J. Legacy effects of altered flooding regimes on decomposition in a boreal floodplain / J. M. J. Sarneel, G. F. C. Veen // *Plant Soil.* – 2017. – V. 421. – P. 57-66.