

На правах рукописи



Матвиенко Анастасия Игоревна

**ВЛИЯНИЕ АЗОТА НА МИНЕРАЛИЗАЦИЮ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ
ПОД ЛИСТВЕННИЦЕЙ СИБИРСКОЙ И СОСНОЙ ОБЫКНОВЕННОЙ**

Специальность 03.02.08 – «Экология (биология)(биологические науки)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в лаборатории биогеохимических циклов в лесных экосистемах федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – ФИЦ КНЦ СО РАН.

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор РАН
Меняйло Олег Владимирович

Официальные оппоненты: **Гавриков Владимир Леонидович,**
доктор биологических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет», кафедра экологии и
природопользования, профессор.
Семенов Михаил Вячеславович,
кандидат биологических наук,
федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Почвенный институт
имени В.В. Докучаева», отдел биологии и
биохимии почв, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова»

Защита состоится 20 сентября 2017 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.119.02 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный 79, ауд. Р8-06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте организации <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Глушченко Лариса Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Антропогенная деятельность, производство азотных удобрений разбалансировали глобальный цикл азота (N) в большей степени, чем углерода (C) (Fields, 2004; Vitousek et al., 1997). При этом, поступление азота в экосистемы, как в виде удобрений, так и с атмосферными осадками приводят к существенным изменениям в процессах не только азотного, но и углеродного цикла (Меняйло и др., 2012, Vitousek et al., 1997). Внесение азота в экосистему, как правило, приводит к росту ее биологической продуктивности и накоплению углерода в растениях (Fleischer et al., 2013). Судьба же основного резервуара углерода в биосфере, почвенного углерода, менее однозначна. Внесение азота может приводить как к накоплению (Sillen, Dieleman, 2012), так и к потере почвенного C (Mack et al., 2004). Анализ литературы указывает на преобладающее накопление углерода в почве при повышенном поступлении N, вследствие подавления активности гетеротрофных микроорганизмов (Janssens et al., 2010). Однако, большинство публикаций основано на экспериментах, проведенных в странах с высоким уровнем промышленных выбросов и азотсодержащих осадков (Reay et al., 2008; Liu et al., 2013). Предполагается, что при низких или средних показателях поступления азота в экосистемы отклик процессов трансформации углерода может быть принципиально другим (Reay et al., 2008). В Сибири азотные поступления из атмосферы являются одними из самых низких в мире (до 2 кг/га в год) (Dentener et al., 2006). Данные о влиянии азота на минерализацию почвенного углерода (C-минерализацию) в Сибири до сих пор отсутствуют.

Актуальность изучения влияния азотных удобрений в лесных экосистемах Сибири определяется еще и острой необходимостью применения минеральных азотных удобрений в случае интенсификации лесного хозяйства и устойчивого (неистощительного) лесопользования. Бореальные и умеренные леса России характеризуются замкнутым циклом азота, при котором минерализация органического вещества почвы является главным источником азота для древостоев (Разгулин, 2012, 2014). Вклад азотных поступлений из атмосферы и биологической фиксации азота мал (2–4 кг N/га год) и составляет лишь малую долю от годовой потребности древостоев в азоте (100–150 кг/га). В процессе лесозаготовок происходит вынос большого количества азота с растительной биомассой, по данным А. И. Бузыкина при рубке 40-летнего сосняка выносятся 500 кг N/га (Бузыкин, 1989). При нелегальных рубках потери могут составлять 700–800 кг N/га (Комаров и др., 2006). После рубок прекращается естественный круговорот питательных веществ из-за прекращения ежегодного опада, происходит истощение лесных почв, в первую очередь, по азоту (Щавровский и др., 1995; LeBauer, Treseder, 2008). Поэтому,

устойчивое лесопользование должно включать обязательное внесение азотных удобрений.

Эффект от внесения азотных удобрений как на рост растений, так и на минерализацию почвенного углерода, зависит от активности процессов азотного цикла в почве, которые, в свою очередь, определяются многими физико-химическими почвенными факторами. Ранее было показано, что процессы азотного цикла в почве в наибольшей степени подвержены влиянию различных древесных пород (Menyailo et al., 2002a, 2003). Поэтому, в этой работе влияние внесения азотных удобрений на процессы трансформации почвенного углерода изучалось впервые под разными древесными породами.

Цель работы – установить влияние внесения азота на минерализацию почвенного углерода в почвах под разными древесными породами в условиях искусственных лесопосадок.

Задачи исследования:

1. Установить влияние добавления азота на общую эмиссию CO_2 из почв в атмосферу и гетеротрофную активность под двумя древесными породами в 3-х летнем полевом эксперименте;
2. Выявить влияние последовательного внесения азота на активность минерализации органического вещества почвы разной степени гумификации в годовом инкубационном эксперименте.
3. Определить влияние внесения азота в различных концентрациях на активность минерализации углерода в органических (подстилках) и в верхних минеральных горизонтах почв под двумя древесными породами.

Научная новизна. Впервые для лесных почв Сибири проведен трехлетний полевой эксперимент с внесением азота и последующим регулярным измерением эмиссии CO_2 . Показано, что внесение азота приводит к достоверному увеличению эмиссии CO_2 , что связано с увеличением скорости минерализации органического вещества. Показано, что одноразовое внесение азотных удобрений стимулирует активность гетеротрофов и этот эффект проявляется 1–2 года в зависимости от древесной породы. Доказано, что влияние азота на С-минерализацию под разными древесными породами отличается не столько силой эффекта в отдельные времена, сколько его длительностью: влияние азота продолжалось 2 года под сосной и 1 год – под лиственницей. С помощью серии инкубационных экспериментов было продемонстрировано, что увеличенная эмиссия CO_2 при внесении азотных удобрений в полевых условиях происходит из-за повышения активности гетеротрофных микроорганизмов, минерализующих углеродсодержащие соединения. Причем, максимальный эффект азота проявляется в органических горизонтах лесных почв (подстилках). Впервые показано, что эффект добавления азота слабо зависит от концентрации вносимого азота. Предложено, иммобилизация

азота микробной биомассой без ее роста ответственна за отсутствие эффекта концентрации.

Теоретическая и практическая значимость работы. Увеличение поступления азота в экосистемы – одно из основных последствий глобального увеличения антропогенного влияния на природу. Исследования изменений в биогеохимических циклах, возникающих при увеличении азотных поступлений, могут быть использованы для прогноза изменения экосистем, изменений содержания органического вещества в лесных почвах. Почти 20 лет назад Памэла Матсон из США писала, что все бореальные и умеренные леса уже загрязнены азотом, и поздно в них изучать начальные стадии азотного загрязнения или низкие дозы внесения азота, к которым эти экосистемы уже нечувствительны. Она предложила изучать начальные стадии в тропических лесах (Matson et al., 1999), похоже, совсем упустив из виду обширные лесные территории Сибири, где уровень азотных депозиций и по сей день очень низок (<2 кг/га). Настоящая работа является первой в Сибири, где влияние азота на эмиссию CO_2 изучено в полевых условиях, в течение трех лет, под двумя древесными породами. Получен положительный эффект азота на С-минерализацию, что указывает на возможность использования лесных почв Сибири для изучения начальных стадий антропогенных азотных нагрузок. Полученные результаты могут быть использованы при чтении курсов по биогеохимии, экологии и почвоведению в учебных заведениях высшего образования.

Защищаемые положения:

1. Положительный эффект азота на скорость С минерализации, обнаруженный на серой лесной почве под лиственницей сибирской и сосной обыкновенной на опыте Н. В. Орловского, связан с увеличением активности гетеротрофных почвенных микроорганизмов.
2. Древесные породы оказывают неодинаковое влияние на длительность воздействия азотных удобрений на минерализацию органического вещества почв.
3. Увеличение гетеротрофной активности в почве при внесении азотных удобрений ведет к потере почвенного углерода в количествах, сопоставимых с дополнительным приростом биомассы деревьев за счет внесения азотных удобрений.

Личный вклад автора. Автор лично принимал участие на всех этапах подготовки и проведения работы: в подборе пробных площадей, отборе почвенных образцов, измерении полевой эмиссии CO_2 , проведении инкубационных экспериментов, статистической обработке и интерпретации результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы регулярно докладывались на конференциях молодых ученых Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (Красноярск, 2014–2016 гг.), на Всероссийской научной конференции с международным участием «Лесные биогеоценозы бореальной зоны: география, структура, функции, динамика» (Красноярск, 2014 г.), на Всероссийской научной конференции «Научные основы устойчивого управления лесами» (Москва, 2014 г.),

на конгрессе Европейского Геофизического Союза (Австрия, 2015 г.) на Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодёжь и наука: Проспект Свободный» (Красноярск, 2015 г.), VI Всероссийской научной конференции по лесному почвоведению с международным участием «Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения» (Сыктывкар, 2015 г.), на съезде Докучаевского общества почвоведов России (Белгород, 2016 г.).

Публикации. По материалам исследований опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации. Основные положения диссертации опубликованы полностью и докладывались на всероссийских и международных конференциях, сделано 10 докладов.

Объем и структура диссертации. Диссертация включает: введение, обзор литературы, описание объектов и методов исследования, обсуждение экспериментальных результатов, выводы, список литературы. Диссертация изложена на 147 страницах, содержит 9 таблиц, 30 рисунков. Список литературы включает 281 наименование, в том числе 168 англоязычных.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д.б.н., проф. РАН О. В. Меняйло за постоянное внимание к работе, а также коллективу лаборатории биогеохимических циклов в лесных экосистемах ИЛ СО РАН за доброжелательную рабочую атмосферу и студентам СФУ и СибГТУ за помощь в полевом эксперименте, особенно в установке колец.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

В трех разделах первой главы рассмотрена имеющаяся современная литература по особенностям азотного цикла в лесных почвах и влиянию антропогенного поступления азота на лесные экосистемы и минерализацию органического вещества в почвах.

Отмечено, что с точки зрения биогеохимии азота лесные экосистемы России отличаются низким уровнем азотных поступлений (Dentener et al., 2006) и их функционирование связано с минерализацией почвенного органического вещества и последующим превращением в процессе жизнедеятельности микроорганизмов соединений азота (Разгулин, 2012, 2014). Рассмотрено применение азотных удобрений в сосновых лесах России в 60–80-гг прошлого века (Бузыкин, 1989). В этих работах отмечено положительное влияние удобрений на продуктивность лесных фитоценозов (Шавровский и др., 1995; Степаненко, 2010), их ингибирующее воздействие на лишайниковый и моховой покров (Бузыкин и др., 1996), уменьшение

запасов лесной подстилки (Шапченкова и др., 2015; Ковалева, Собачкин, 2016). Отмечено, что изменения органического вещества почв при внесении азота изучено слабо (Рожков и др., 2005). В настоящее время большинство исследований, изучающих механизмы влияния антропогенного азота на почвенные процессы в умеренных и бореальных лесных экосистемах, проводятся в Центральной Европе, США, Китае, в странах с высоким уровнем азотных депозиций (Меняйло и др., 2014). Они показывают накопление почвенного углерода при поступлении азотных удобрений, что объясняется отрицательным воздействием азота на C-минерализацию, возникающим как из-за подавления активности грибов-лигнолитиков, так и из-за полимеризации высоко-гумифицированного органического вещества.

Также рассмотрены особенности функционирования основных биологических источников CO_2 в почвах лесных экосистем и перечислены основные методологические приемы раздельного изучения активности автотрофного и гетеротрофного компонентов. Подчеркивается, что различный отклик на изменяющиеся факторы окружающей среды обуславливает необходимость изучения гетеротрофного и автотрофного компонентов почвенного дыхания раздельно.

Глава 2. Объекты и методы исследования

В главе описываются объекты и методы исследования, используемые в полевых и лабораторных инкубационных экспериментах.

Полевые исследования проведены на многолетнем эксперименте с лесными культурами Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, заложенного по инициативе проф. Н. В. Орловского (опыт Н. В. Орловского). Эксперимент включает шесть древесных пород, для внесения азота были выбраны только участки с двумя древесными породами - сосной и лиственницей. Выбор этих пород определялся разной почвенной микробиологической активностью процессов азотного цикла под ними. Химические, физические и микробиологические свойства почв и таксационные показатели культур опубликованы ранее (Меняйло, 2008; Menyailo et al., 2002a, б.; Решетникова, Ведрова, 2014; Решетникова, 2011, 2015).

Влияние азота на минерализацию углерода в почве под деревьями двух древесных пород устанавливалось по динамике изменения эмиссии CO_2 из почв на контрольных участках и участках с внесенным азотом. Эмиссия CO_2 измерялась инфракрасным газовым анализатором Li-8100A, с использованием метода сетчатых колец, разработанного в Великобритании (Johnson et al., 2001) и адаптированного для разделения источников почвенного CO_2 (Матвиенко и др., 2014). Мелкое кольцо, высотой 10 см, врезалось в подстилку до уровня минеральной почвы, поток CO_2 из него характеризовал сразу три биологических источника – корни, микориза и микроорганизмы. Второе кольцо (высота 32 см), установленное на глубину, исключало прорастание внутрь корней и микоризы, и поток CO_2 из него имел только

гетеротрофное происхождение. Кольца установлены в мае 2010 года. Азотные удобрения внесены в июне 2010 года из расчета 50 кг N/га, в форме нитрата аммония (в сухом виде) на участках площадью 8 м² в четырех повторностях. Одновременно с измерениями эмиссии CO₂ измеряли влажность почвы с помощью сенсора ThetaProbe ML2x (Delta T Devices Ltd.) и температуру почвы с помощью датчиков DT400 (Comark Instruments, Великобритания).

Для каждого года измерений отдельно был проведен четырехфакторный дисперсионный анализ ANOVA с четырьмя главными факторами: фактор «Древесная порода» включал 2 уровня: сосна и лиственница; фактор «Тип кольца» – 2 уровня: мелкое кольцо и глубокое кольцо; фактор «Внесение азота» – 2 уровня – с азотом и без; фактор «Время» – включал 9 точек для 2010 года и по 11 точек для 2011 и 2012 года. Влияние фактора считалось достоверным при $P < 0,05$. Статистическая обработка данных проведена с использованием программы Statistica (version 10; StatSoft, Inc, Tulsa, OK).

В лабораторных инкубационных экспериментах объектами исследования служили образцы верхнего минерального горизонта почв А1 (0–10 см) и подстилки отобранных на участках с лиственницей сибирской и сосной обыкновенной на опыте Н. В. Орловского.

Измерения скорости образования CO₂ в них проводили с помощью анализатора CO₂, соединенной с 16-канальным мультиплексором и инкубатором, поддерживающим постоянную температуру. Всего было проведено 4 инкубационных эксперимента.

Первый эксперимент длился год. Азот вносился несколько раз: в первый день и через неделю от начала эксперимента – в низкой концентрации (50 кг N/га), через два месяца – в высокой (500 кг N/га) в форме NH₄NO₃. Для поддержания одинаковой влажности в образцах, в течение года вносили необходимое количество дистиллированной воды. Для точного вычленения влияния азота (уменьшения влияния неоднородности почвенных образцов) была рассчитана относительная активность минерализации углерода для каждого образца как процент от первоначальной активности (до внесения азота).

Второй эксперимент проходил с внесением азота в разных концентрациях. Азот вносили в форме NH₄NO₃, концентрация вносимой соли соответствовала поступлению: 0,5, 1, 10, 50, 250, 500 и 1000 кг N/га. Образцы инкубировались по трое суток, в течение которых активность выделения CO₂ измерялась 12 раз (каждые 6 часов).

В третьем эксперименте инкубировали образцы подстилки сосны с добавлением азота в низкой концентрации (50 кг N/га $\approx$ 17 мкг/г), образцы с высокой концентрацией (1000 кг N/га $\approx$ 340 мкг/г), отдельно с глюкозой (2 мкг С/г), образцы в которых присутствовал азот и добавлялась глюкоза. Азот (в форме NH₄NO₃) и глюкозу вносили в растворенном в дистиллированной воде виде. Для поддержания

изначально одинаковой влажности в некоторые образцы вносили нужное количество дистиллированной воды. Образцы инкубировались трое суток, с постоянной температурой (20 °C) и влажностью (60 % ППВ). Во время инкубации активность выделения CO₂ измерялась 12 раз (каждые 6 часов).

В четвертом эксперименте азот вносили в форме раствора NH₄NO₃ 10 раз в течение эксперимента, с периодичностью раз в трое суток, концентрация вносимой соли соответствовала поступлению 50 кг N/га. Скорость образования CO₂ измеряли до внесения и сразу после внесения N, всего 11 раз. Каждая инкубация после внесения азота длилась трое суток в течение которых активность выделения CO₂ измерялась 12 раз (каждые 6 часов).

Инкубации проводились при постоянной температуре (20 °C) и влажности (60 % ППВ), в контрольные образцы (без азота) вносили дистиллированную воду в необходимом количестве. Данные были подвергнуты многофакторному дисперсионному анализу с повторяющимися измерениями с использованием программы Statistica (version 10; StatSoft, Inc, Tulsa, OK).

Глава 3. Влияние внесения азота на полевую эмиссию CO₂ под двумя древесными породами

В главе анализируются и обсуждаются основные факторы, определяющие сезонные и межгодовые изменения эмиссии CO₂ из почв и результаты полевого трехлетнего эксперимента по внесению азота.

Влияние азота на скорость эмиссии CO₂ в полевых условиях за три года измерений показано на рисунке 1. Дисперсионный анализ выявил положительное влияние добавления азота (главный эффект) на эмиссию CO₂ из почв под лиственницей сибирской и сосной обыкновенной. Внесение азота увеличило скорость выделения CO₂ из глубоких и мелких колец, что дает основания предполагать, что повышении активности гетеротрофных микроорганизмов отвечает за увеличившуюся эмиссию CO₂. Важным является разная длительность влияния азота под разными древесными породами: под лиственницей эффект длился один год и под сосной – два года.

Влияние добавления азота на общее количество углерода, выделившееся за вегетационный сезон (рис. 2), оценивали с помощью 3-х факторного дисперсионного анализа для каждого года отдельно. В первый год добавление азота увеличило количество выделившегося CO₂ под обеими древесными породами (P<0,001). На второй год эффект добавления азота был статистически значим (P<0,01) только под сосной, а под лиственницей он пропал, что еще раз подтверждает влияние древесной породы на длительность действия азотных удобрений. В 2012 году (последний год измерений), эффект азота не наблюдался вовсе (рис.2).

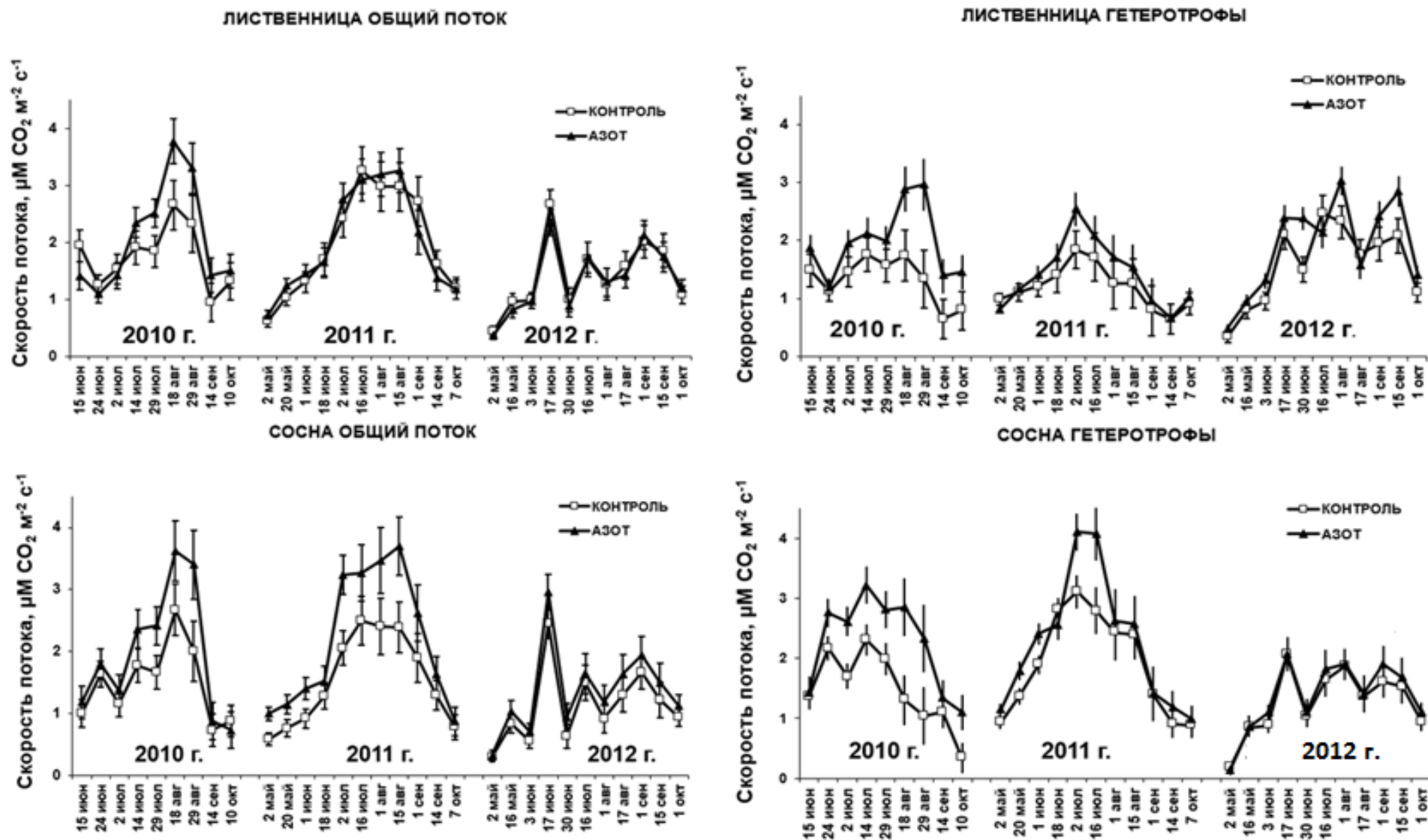


Рисунок 1. Скорость потока углекислого газа, измеренная в течение трех вегетативных сезонов с 2010 по 2012 гг. под лиственницей и сосной в мелких (все источники CO₂) и в глубоких (только гетеротрофные микроорганизмы) кольцах; Приведены средние значения и стандартные ошибки (n=4).

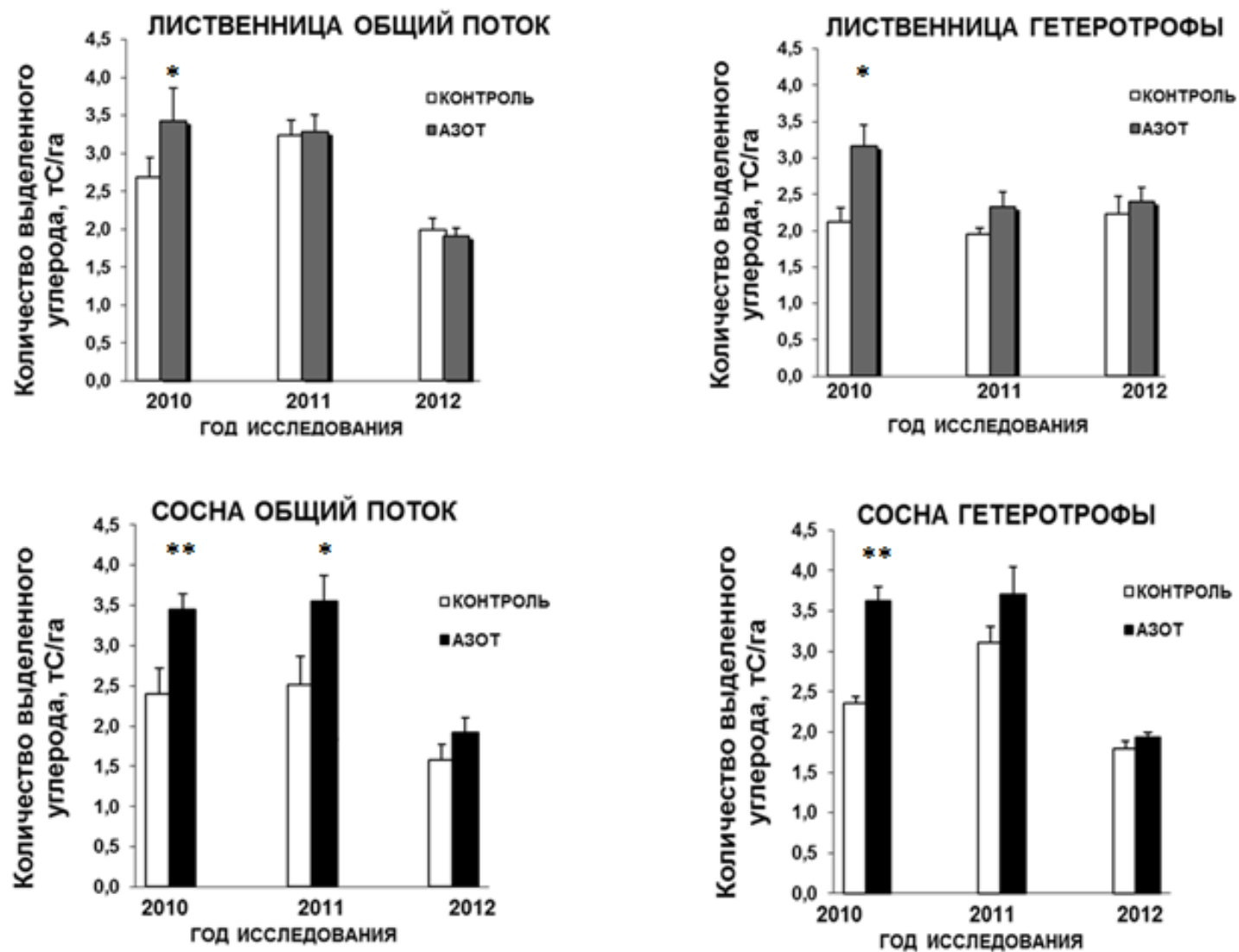


Рисунок 2. Общее количество углерода, выделившееся за вегетативные сезоны с 2010 по 2012 гг. под лиственницей и сосной в мелких (все источники CO_2) и в глубоких (только гетеротрофные микроорганизмы) кольцах; Приведены средние значения и стандартные ошибки ($n = 4$).

Для оценки роли азотных удобрений в изменении общего экосистемного баланса углерода был подсчитаны приросты углерода надземной растительной биомассы и потери почвенного углерода за два года. Известно, что внесение 1 г азота приводит, в среднем, к дополнительному накоплению 25 г углерода в надземной биомассе бореальных лесов (Fleischer et al., 2013). Однократное внесение азотных удобрений в дозе 50 кг/га, как в данной работе, должно приводить к дополнительному накоплению 1,25 т углерода в деревьях. В полевом эксперименте общие потери из почвы составили 600-650 кг под лиственницей и около 2 т – под сосной (рис.3).

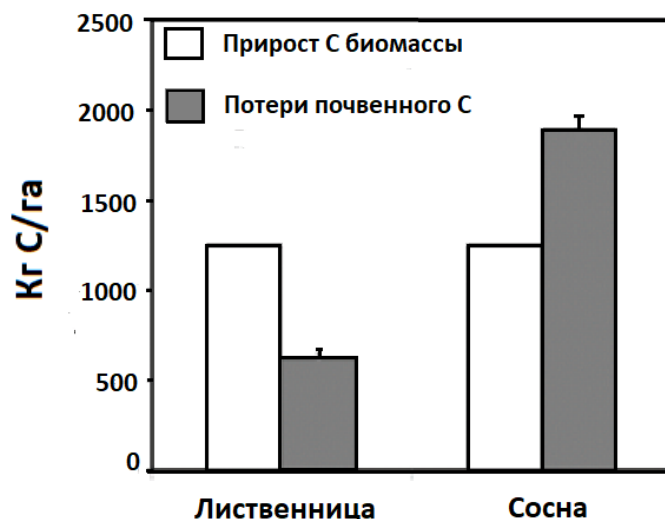


Рисунок 3. Прирост углерода надземной растительной биомассы и потеря почвенного углерода при однократном внесении 50 кг N/га в почву под сосной и лиственницей.

Таким образом, потери С из почвы могут составлять половину как под лиственницей, или даже превышать накопление углерода в растительной биомассе, как под сосной, уменьшая или вообще сводя на нет положительный эффект от внесения минеральных азотных удобрений.

Глава 4. Роль биотических взаимодействий в почве в регуляции азотного эффекта

В главе проанализированы данные по динамике эмиссии CO₂ полученные с помощью метода сетчатых колец из трех основных источников почвенного дыхания: 1) корней растений, 2) микроорганизмов и 3) микоризы в течение вегетационного периода 2011 года в почве под сосняком и лиственничником расположенных на опыте Н. В. Орловского.

Выявлено, что древесные породы неодинаково влияли на автотрофный и гетеротрофный компоненты почвенного дыхания. Корни и микориза конкурируют с гетеротрофными микроорганизмами за воду и питательные элементы и в некоторых случаях, исключение корней приводит к повышению активности гетеротрофов – эффект Гадгила (Gadgil, Gadgil, 1971, 1975). Показано, эффект Гадгила, проявился

только под сосной, и, следовательно, определяется древесной породой. Так под сосной, скорость эмиссии CO_2 из глубокого кольца без микоризы превышала таковую из глубокого кольца с микоризой, что говорит об ингибировании микоризой активности гетеротрофных микроорганизмов. Данный эффект (Гадгила) наблюдался только в первую половину лета (с 20 мая по 18 июня). Во вторую половину лета поток CO_2 из микоризных колец, как и ожидалось, превышал поток CO_2 из немикоризных колец под обеими породами, что свидетельствует о преимущественном транспорте углерода в микоризу во второй половине лета и начале осени, вклад которой в эмиссию CO_2 составил около 20 % под обеими породами.

Предполагается, что наличие Гадгил-эффекта под сосной может быть объяснением более длительного отклика на внесение азота под этой породой. Дополнительный азот ослабляет конкуренцию между микоризой и гетеротрофными почвенными микроорганизмами, что дает увеличение активности последних и эмиссии CO_2 .

Глава 5. Лабораторные инкубационные эксперименты

В главе рассматриваются результаты 4 лабораторных инкубационных эксперимента, проведенных для выяснения механизмов воздействия азота на минерализацию почвенного углерода с образцами подстилки и верхнего минерального горизонта почв, которые были отобраны на участках с лиственницей сибирской и сосной обыкновенной на опыте Н. В. Орловского.

В первом годовом эксперименте азот вносили три раза: в первый день, через неделю от начала эксперимента – в низкой концентрации и через два месяца – в высокой концентрации, в форме раствора NH_4NO_3 . Достоверный отклик на внесение азота наблюдался только в образцах минерального горизонта, отобранного под сосной (рис. 4). Положительный эффект азота проявился сразу после первого внесения удобрения. Значимое увеличение скорости минерализации углерода наблюдалось в течение первых суток после внесения азота, затем эффект пропал. Повторное внесение азота через неделю в той же концентрации не оказало никакого воздействия. Через два месяца, когда был внесен азот в высокой концентрации, обнаружился отрицательный эффект азота, длящийся полгода.

Положительный эффект азота на скорость минерализации в почве мы наблюдали в полевом эксперименте, но возникает вопрос о причинах отрицательного эффекта. Известно, что внесение N в почву с более старым органическим веществом с большим содержанием лигнина может вызывать подавление активности C-минерализации из-за полимеризации азотом продуктов разложения органического вещества (Dijkstra et al., 2004; Hobbie et al., 2012). Предполагается, что в годовом эксперименте отрицательный эффект был получен, так как высокая доза азота

вносилась уже после 2-х месяцев инкубации, когда сильно уменьшилось содержание свежего углерода в образцах. Однако, возможно, что высокая концентрация азота подавляла активность почвенных гетеротрофных микроорганизмов.

Для того чтобы проверить ингибирует ли высокая концентрация азота С-минерализацию, был проведен *второй инкубационный эксперимент* с добавлением N в широком диапазоне концентраций (соответствующем поступлению от 0,5 до 1000 кг N/га).

Оказалось, что при всех концентрациях внесенного азота активность минерализации была больше, чем в контроле (рис. 5), т.е. эффект азота был положительным, и замечен, в отличие от первого эксперимента, только в подстилках! В подстилке сосны при внесении азота, начиная от 250 кг/га, положительный отклик С-минерализации уменьшился, что, вероятно, связано с увеличением кислотности из-за внесения высоких концентраций азота. Тем не менее, при низких концентрациях N, и в подстилке сосны, и в подстилке лиственницы отклик был примерно одинаков.

Поскольку образование CO₂ увеличивалось в образцах подстилки обеих пород и при всех концентрациях (рис. 5), можно утверждать, что концентрация внесенного азота не влияет на направленность эффекта, т.е. он не переходит из положительного в отрицательный при увеличении концентрации вносимого азота. Таким образом, вторым экспериментом показано, что высокая доза азота не вызывает отрицательного эффекта и причиной его в годовом эксперименте остается срок инкубации и образование при участии азота соединений с большим молекулярным весом, плохо поддающихся разложению.

По результатам второго эксперимента возник вопрос о причине практически одинакового отклика С-минерализации на разные концентрации добавленного азота. Предположительно этому явлению есть два объяснения: 1) запас легкодоступного углерода в почвенных образцах быстро заканчивается, и минерализация органического вещества затормаживается, 2) большая часть внесенного азота немедленно поглощается (иммобилизуется) микробным комплексом (Евдокимов и др., 2005), и лишь малая его часть расходуется на стимуляцию микроорганизмов к дополнительной минерализации углерода. *Третий лабораторный инкубационный эксперимент* был проведен, чтобы проверить, зависит ли влияние азота на скорость минерализации от наличия органического легкодоступного субстрата. Азот в образцы вносился вместе с глюкозой и без. Оказалось, что добавление глюкозы совместно с азотом не приводит к увеличению отклика С-минерализации, и даже снижает его, особенно при высоких концентрациях азота (рис. 6). Значит, одинаковая активность минерализации углерода при добавлении азота в широком диапазоне концентраций, обнаруженная в предыдущем инкубационном эксперименте, не связана с лимитированием активности почвенных гетеротрофов доступным углеродом. Таким образом, вероятным объяснением одинакового отклика

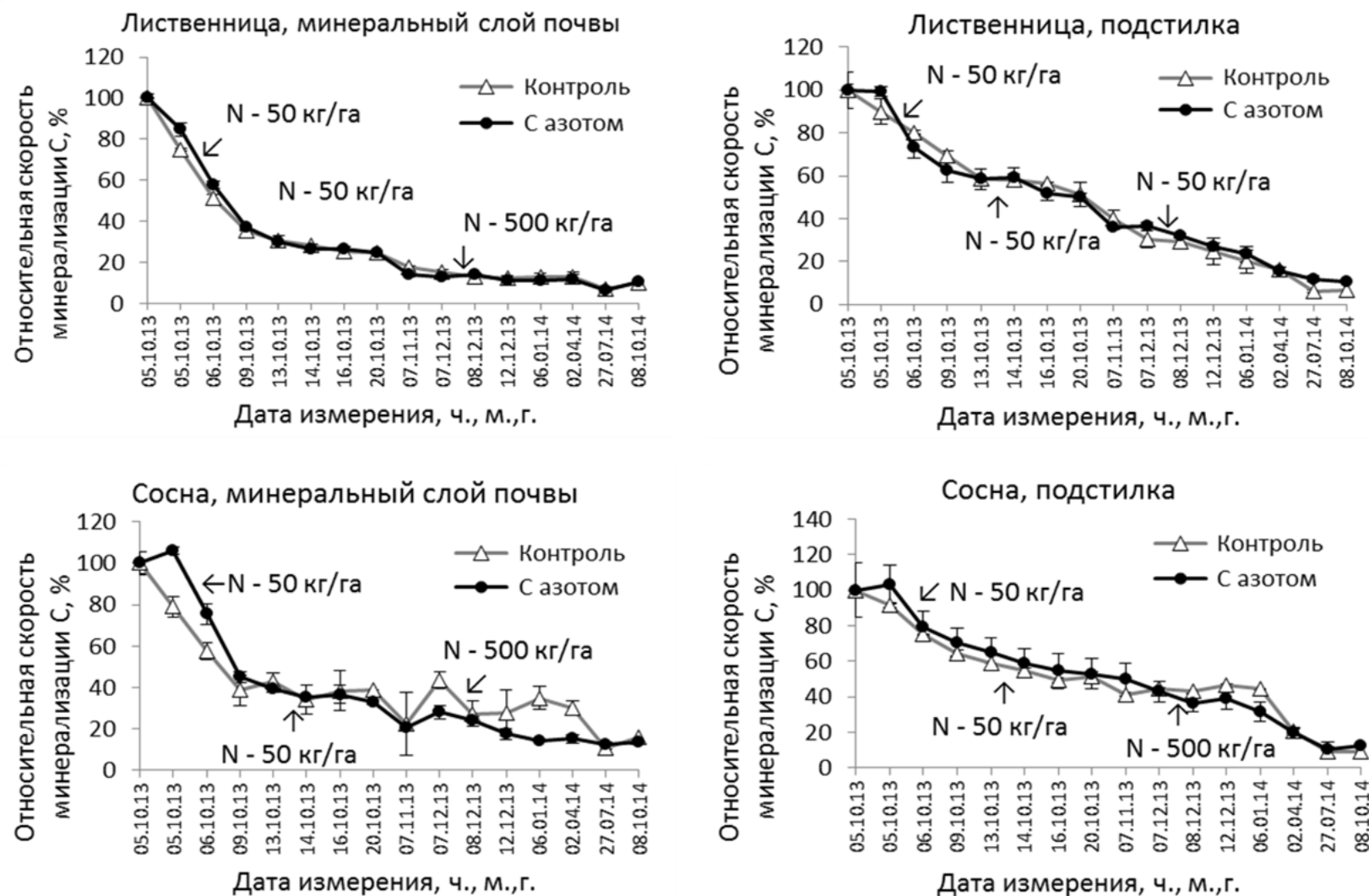


Рисунок 4. Динамика относительной активности минерализации углерода в подстилках и минеральном горизонте почв под двумя древесными породами. Указаны средние значения и стандартные ошибки (n=3)

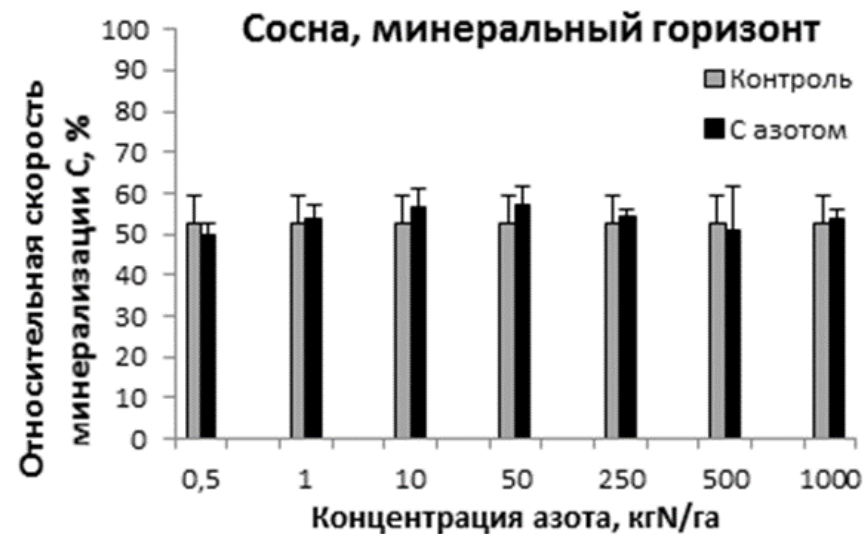
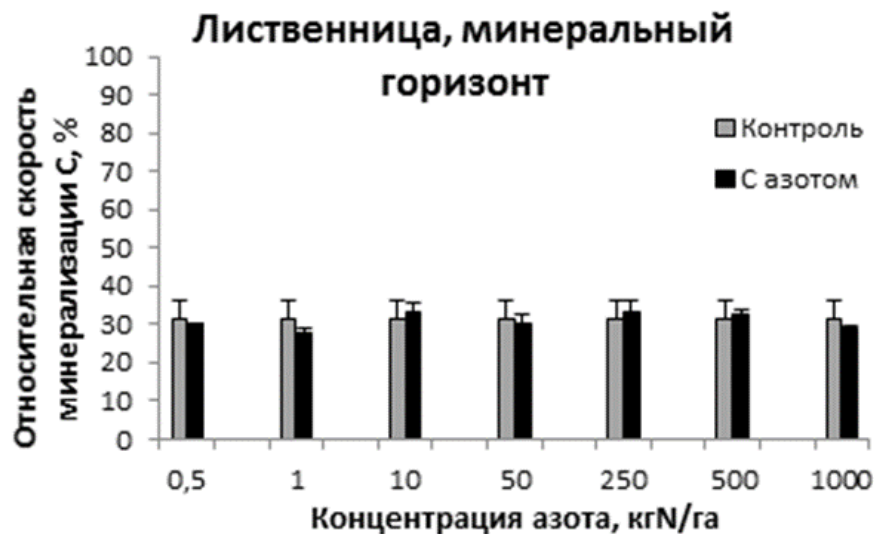
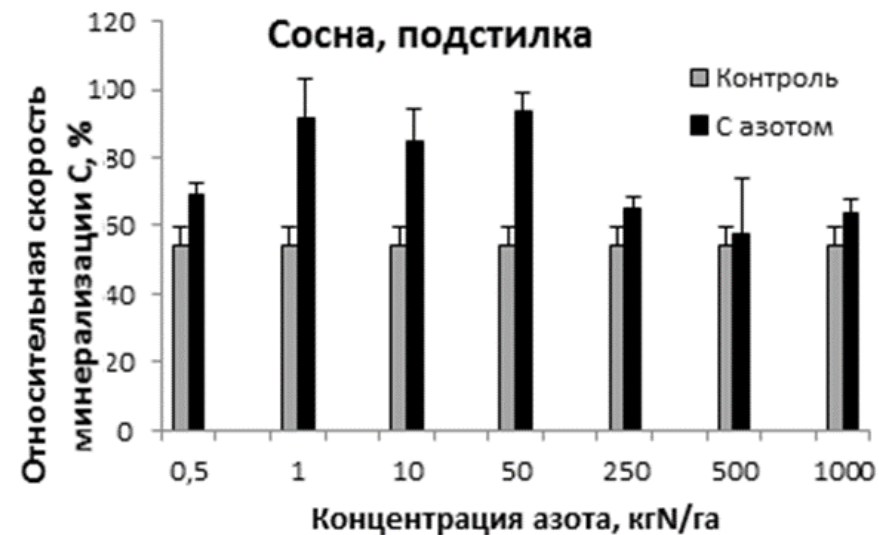
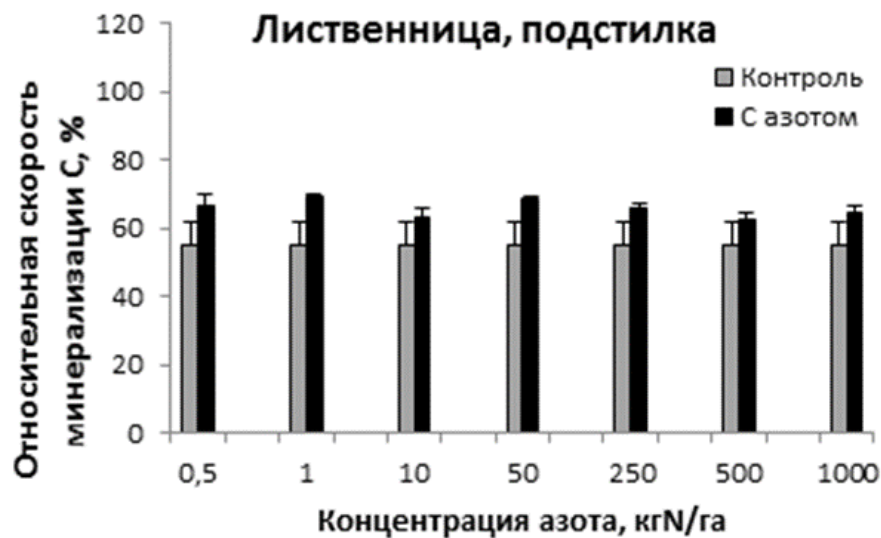


Рисунок 5. Активность минерализации углерода в подстилках и минеральном горизонте почв под двумя древесными породами при внесении азота в разных концентрациях. Указаны средние значения и стандартные ошибки (n=3)

во втором эксперименте является поглощение внесенного азота микробным комплексом. Аналогичное явление было обнаружено И. В. Евдокимовым и коллегами, которые изучали возможности почвенного микробного сообщества по иммобилизации различных доз (от низких до экстремально высоких) минерального ^{15}N (Евдокимов и др., 2005).

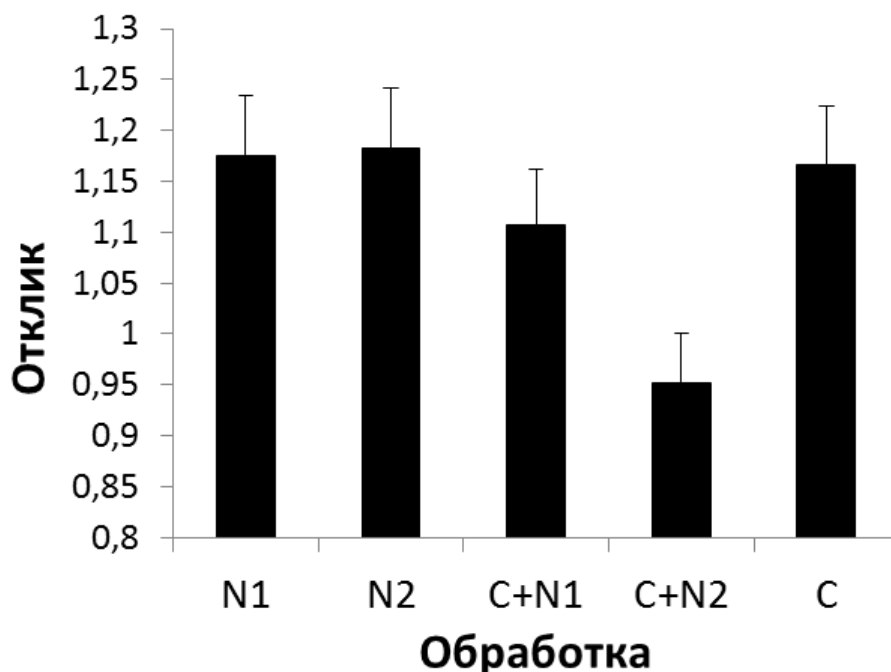


Рисунок 6. Средняя активность минерализации углерода в образцах подстилки сосны, при внесении азота и углерода, отдельно и совместно. Указаны средние значения и стандартные отклонения ($n=3$), N1, N2 – низкая и высокая концентрация азота, соответственно, C – глюкоза.

Для прогноза влияния поступления азота на экосистему важно выявить при каких условиях эффект внесения азота перестает быть положительным, как у нас в полевых условиях, и переходит в отрицательный, как в Европе и в США. Следует отметить, что в большинстве публикаций по исследованию влияния азота на накопление углерода в почве, анализируется постоянное, регулярное внесение удобрений азота в экосистемы. Поэтому, был проведен *четвертый инкубационный эксперимент* с регулярным (каждые 3 сут.), десятикратным добавлением азотного удобрения (в концентрации соответствующей поступлению 50 кг N/га), симулирующий постоянное поступление азота в почву

Эксперимент дал схожие результаты со вторым экспериментом. Уже после первого добавления азота скорость минерализации увеличилась только в подстилках (Рис. 7), причем больше под сосной, чем под лиственницей. Последующие добавления не изменили принципиально эффект. В целом, имитация постоянного поступления азота не привела к смене положительного отклика на отрицательный. Это указывает на возможную роль растений и микоризы, которые отсутствуют в инкубационных экспериментах, в смене направленности эффекта.

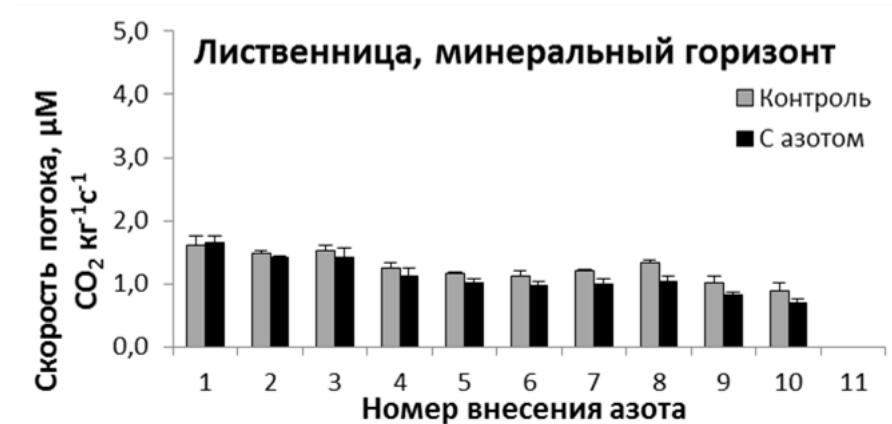
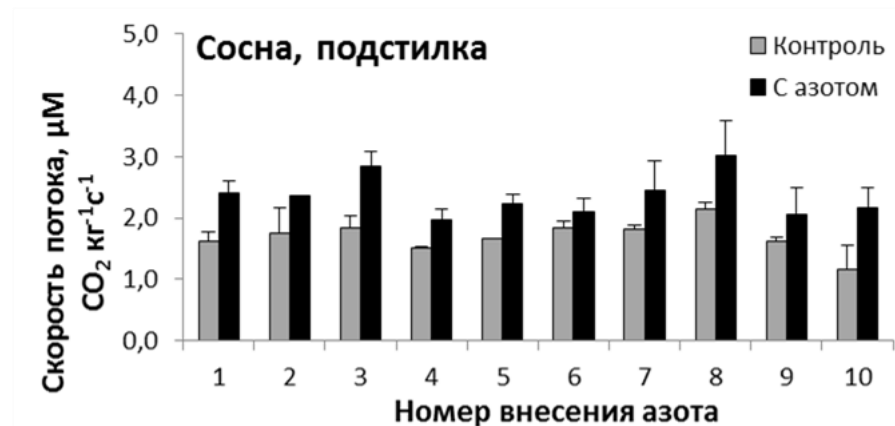
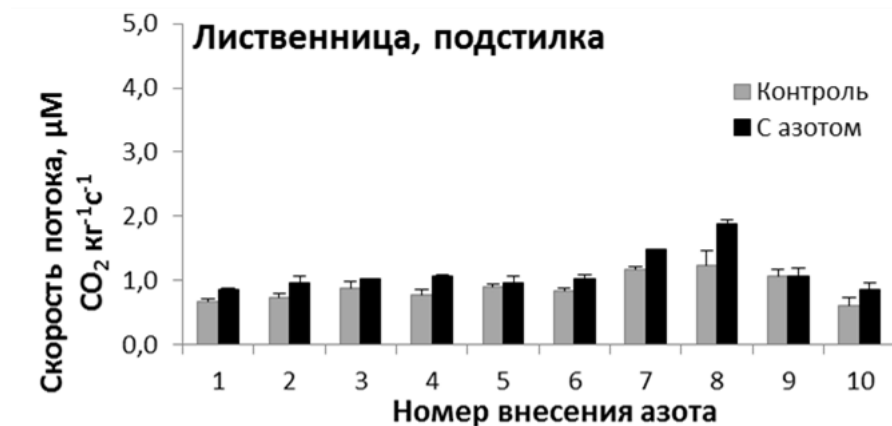


Рисунок 7. Динамика активности минерализации углерода в подстилках и минеральном горизонте почв под двумя древесными породами при последовательном добавлении азота. Указаны средние значения и стандартные ошибки (n=3).

Заключение

В работе впервые для лесных почв Сибири показан положительный эффект добавления азота на активность минерализации углерода, ведущей к его потерям из почвы. Выявлено, что этот эффект имеет разную длительность под разными древесными породами – один год под лиственницей и два года под сосной. Потери почвенного углерода за счет внесения азота оказались сопоставимы с дополнительным приростом древесной биомассы, поэтому эти потери следует учитывать при планировании мероприятий по внесению азотных удобрений. Серия инкубационных экспериментов подтвердила, что увеличенная эмиссия CO_2 при внесении азотных удобрений в полевых условиях происходит из-за повышения активности гетеротрофных микроорганизмов, минерализующих углеродсодержащие соединения. Причем, максимальный эффект азота проявляется в органических горизонтах лесных почв

Выводы

1. В трехлетнем полевом эксперименте обнаружен положительный эффект внесения азота на эмиссию CO_2 из почв под лиственницей сибирской и сосной обыкновенной. Показано, что не столько масштаб эффекта, сколько его длительность, зависит от древесной породы. Так под лиственницей он был значимым один год, а под сосной – два года.
2. Суммарные потери почвенного углерода за 2 года за счет внесения 50 кг N/га составили 600–650 кг под лиственницей и 1,8–2 т – под сосной. Потери почвенного углерода сопоставимы с дополнительным приростом древесной биомассы от внесения азота, сводя на нет положительный эффект от его внесения.
3. Увеличение потока CO_2 связано, в основном, с повышением активности гетеротрофов, использующих дополнительный азот для повышения активности минерализации органического вещества.
4. С помощью метода сетчатых колец подтвержден эффект Гадгила (конкуренция между автотрофами и гетеротрофами) и показано его сильное влияние на эмиссию CO_2 из почв. Доказано, что эффект Гадгила зависит от древесной породы: гетеротрофный поток превышал общую эмиссию CO_2 только под сосной, но не под лиственницей. Впервые показано, что уровень конкуренции между автотрофами (корнями и микоризой) и гетеротрофными микроорганизмами определяется, в большей степени, древесными породами, а не типом или механическим составом почв.
5. Серия инкубационных экспериментов показала, что добавление N, в большинстве случаев, увеличивает активность C-минерализации в подстилках обеих древесных пород, т.е. потери углерода при внесении

азота происходят за счет увеличения активности С-минерализации именно в подстилках.

6. Добавление N может вызвать ингибирование активности С-минерализации только в поздних стадиях инкубации, когда заканчивается свежее органическое вещество, что объясняется полимеризацией более старого сильно-гумифицированного органического вещества.
7. Отклик С-минерализации на внесение разных концентраций N нелинейный. Это объясняется сочетанием разнонаправленных процессов, стимулирующих или ингибирующих С-минерализацию. В целом, концентрация вносимого азота не влияла на активность минерализации С.

Основные результаты и содержание диссертации отражены в публикациях

Публикации в изданиях, включенных в Перечень ВАК при Министерстве образования и науки РФ:

1. Матвиенко, А. И. Биологические источники почвенного CO₂ под лиственницей сибирской и сосной обыкновенной / А. И. Матвиенко, М. И. Макаров, О. В. Меняйло // *Экология*. – 2014. – № 3. – С. 182 – 188.
2. Меняйло, О. В. Положительный отклик минерализации углерода на внесение азота в лесных почвах Сибири / О. В. Меняйло, А. И. Матвиенко, М. И. Макаров, Ш.-К. Ченг // *Доклады Академии Наук*. – 2014. – Т. 456. – № 1. – С. 117 –120.
3. Меняйло, О. В. Определение потока CO₂ из почв: роль глубины колец / О. В. Меняйло, А. И. Матвиенко, М. И. Макаров, А. Л. Степанов // *Экология*. – 2015. – № 2. – С. 120 – 124.

Публикации в других изданиях:

4. Меняйло, О. В. Вклад микоризы в поток почвенного CO₂ под разными древесными породами / О. В. Меняйло, А. И. Матвиенко // Сборник материалов V-ой Всерос. науч. конф. по лесному почвоведению с междунар. участием. Пущино: ИФХиБПП РАН. – 2013. – С. 96–98.
5. Меняйло, О. В. Влияние добавления азота на минерализацию углерода в почвах под разными древесными породами О. В. Меняйло., А. И. Матвиенко // Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы Всероссийской научной конференции. – М.: ЦЭПЛ РАН, 2014. – С. 149–151.
6. Меняйло, О. В. Влияние экстремальной засухи на подземный транспорт углерода под разными древесными породами Математическое моделирование в экологии О. В. Меняйло, А. И. Матвиенко // Материалы Четвертой Национальной научной конференции с международным участием, – Пущино, ИФХиБПП РАН, 2015. – С. 113–116 с.

7. Matvienko, A. I. The effect of nitrogen fertilization on soil surface CO₂ fluxes in Siberian forest soils / A. I. Matvienko, O. V. Menyailo // EGU General Assembly 2015 Geophysical Research Abstracts, 2015. – V. 17, EGU2015-2907.
8. Menyailo, O. V. // The role of ectomycorrhizae of Arolla pine in mediating soil priming / O. V. Menyailo, A. I. Matvienko, Chih-Hsin Cheng // EGU General Assembly 2015 Geophysical Research Abstracts, 2015. – V. 17, EGU2015-2864.
9. Menyailo, O. V. Increase of mycorrhizal C flux in Siberian temperate forests during the extreme drought of 2012 / O. V. Menyailo, A. I. Matvienko // EGU General Assembly 2015 Geophysical Research Abstracts, 2015. – V. 17, EGU2015-2868.
10. Матвиенко А. И. Минерализация углерода в почвах под лиственницей сибирской и сосной обыкновенной: отклик на внесение азота. А. И. Матвиенко, О. В. Меняйло // Проспект Свободный-2015: материалы науч. конф., посвященной 70-летию Великой Победы (15–25 апреля 2015 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – С.18–20.
11. Матвиенко А. И. Влияние азота на эмиссию CO₂ и минерализацию углерода в почвах под лиственницей сибирской и сосной обыкновенной / А. И. Матвиенко, О. В. Меняйло // Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения: Материалы докладов VI Всероссийской научной конференции по лесному почвоведению с международным участием (Коми НЦ УрО РАН). Сыктывкар, 2015. – С.107–109.
12. Матвиенко А. И. Изучение механизмов влияния азота на минерализацию углерода в почвах под лиственницей сибирской и сосной обыкновенной / А. И. Матвиенко, О. В. Меняйло // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В. В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции (Белгород, 15–22 августа 2016 г.). Часть I /Отв. ред.: С.А. Шоба, И.Ю. Савин. – Москва-Белгород: Издательский дом «Белгород», 2016. – С. 302–303.