

На правах рукописи



Махныкина Анастасия Владимировна

Влияние температуры и влажности на эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в сосняках среднетаежной подзоны Средней Сибири

03.02.08 — Экология (биология) (биологические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Красноярск - 2019

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор,  
академик РАН  
**Ваганов Евгений Александрович**

Официальные оппоненты: **Щепашенко Дмитрий Геннадьевич**,  
доктор биологических наук, профессор,  
Международный институт прикладного  
системного анализа, старший научный  
сотрудник лаборатории экосистемных услуг и  
управления

**Дюкарев Егор Анатольевич**  
кандидат физико-математических наук,  
ФГБУН «Институт мониторинга  
климатических и экологических систем СО  
РАН», ведущий научный сотрудник  
лаборатории физики климатических систем

Ведущая организация: ФГБУН «Центр по проблемам экологии и  
продуктивности лесов РАН»

Защита состоится «11» февраля 2020 г. в 14:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 999.119.02 на базе 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 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

канд. биол. наук



Л.А. Глущенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Бореальные леса занимают около 11% земной поверхности суши, являясь одним из крупнейших наземных биомов. Эти леса играют значительную роль в глобальном углеродном цикле и особенно чувствительны к потеплению климата (Lindroth et al., 1998). Почвы бореальной зоны содержат значительные запасы углерода, поэтому их реакция на текущие изменения климата (IPCC, 2001) существенно отразится на устойчивости лесных экосистем и будущей концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

Потенциальное увеличение почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ , вызванное повышением температуры, может увеличить скорость роста концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$ , в том числе за счет положительной обратной связи (Fang, Moncrieff, 2001). Измерения потоков  $\text{CO}_2$  в европейских лесах показывают, что при расчете на единицу площади, в бореальных лесах депонируется меньше атмосферного  $\text{CO}_2$ , чем леса более южных регионов (Valentini et al., 2000), главным образом за счет высоких темпов дыхания почвы по отношению к фотосинтетической активности (Janssens et al., 2001). При потеплении будет наблюдаться увеличение скорости почвенного дыхания, которое будет способствовать постепенному снижению скорости связывания углерода (Raich and Schlesinger, 1992; Davidson et al., 2000). Несмотря на значительный вклад в круговорот углерода, дыхание почвы оказалось чрезвычайно сложным для точной количественной оценки. Как и во многих других почвенных процессах, почвенное дыхание демонстрирует высокие уровни пространственной гетерогенности, и может сильно варьироваться в суточных, сезонных и межгодовых временных масштабах (Law et al., 1999; Buchmann, 2000; Xu and Qi, 2001).

В течение сезона потоки  $\text{CO}_2$  из почвы сильно коррелируют с изменениями температуры почвы, особенно в условиях оптимальной влажности (Yuste et al., 2003). Значительное подавление скорости потоков наблюдается при низком содержании воды в почве (Borken et al., 1999; Irvine and Law, 2002). До сих пор плохо изучена сезонная зависимость почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  от влажности почвы, поскольку изменения температуры почвы и влажности почвы часто коррелируют между собой, и независимое влияние каждой переменной трудно выделить или интерпретировать (Davidson et al., 1998).

При крупномасштабном моделировании почвенной эмиссии обычно используют температуру почвы (Buchmann, 2000), влажность почвы (Davidson et al., 2000), а также их взаимодействие (Lee et al., 2002). Однако они недостаточны для объяснения пространственных изменений дыхания почвы в пределах участка и между участками (Xu и Qi, 2001). Пространственное масштабирование дыхания почвы от полевых измерений до уровней экосистем требует изучения его пространственных изменений (Tang and Baldocchi, 2005). Поэтому необходимо включить как временную,

так и пространственную неоднородность почвенного дыхания в модель с целью перехода от масштаба с камерных измерений дыхания почвы до уровня экосистемы (Han et al., 2007).

**Цель работы** – выявить закономерности влияния температуры и влажности на эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в сосняках среднетаежной подзоны Средней Сибири

**Задачи исследования:**

1. Оценить пространственную вариацию почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в разных типах экосистем;
2. Выявить особенности динамики почвенной эмиссии на различных временных масштабах: суточная, сезонная, межсезонная динамика;
3. Проанализировать влияние основных факторов среды (температура, влажности почвы) на формирование потока CO<sub>2</sub>;
4. Определить пороговое значение влажности почв для максимальной почвенной эмиссии для среднетаежной зоны;
5. Построить адекватную модель сезонного потока почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> для разных типов экосистем.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В пределах одного типа почв величина почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> определяется типом растительного покрова.
2. Условия увлажнения выступают основным лимитирующим фактором для почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> на песчаных подзолах в активной части вегетационного сезона.
3. Усовершенствование экспоненциальной модели почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> для конкретного региона среднетаежных лесов позволяет более детально изучить сезонную динамику почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> и дает инструмент для масштабирования потоков CO<sub>2</sub> на исследуемую территорию.

**Научная новизна.** Впервые проведены длительные измерения сезонной динамики – 5 сезонов измерений для участков с разными типами напочвенного покрова в пределах одной растительной подзоны. Получена характеристика влияния климатических условий территории на величину почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в течение вегетационного сезона. Усовершенствована и верифицирована комбинированная экспоненциальная модель почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>, с учетом специфических особенностей вегетационного сезона и типа напочвенного покрова.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Значимым вкладом научной работы в развитие теоретической базы существующих данных по почвенной эмиссии углерода является актуализированные оценки, необходимые как для составления бюджета углерода лесных экосистем, так и для верификации глобальных вегетационных моделей. Модификация экспоненциальной модели позволяет более точно проследить изменения потока CO<sub>2</sub> с поверхности почв с учетом особенности вегетационного сезона. Практическая значимость работы обусловлена оценкой взаимозависимостей

между типом развития территории и почвенной эмиссией CO<sub>2</sub> на территории лесов бореальной зоны.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в проведении полевых измерительных работ, отборе образцов почв, опада и живого напочвенного покрова. Участвовал в разработке и конструировании экспериментов по рассмотрению влияния факторов среды на динамику сезонного потока CO<sub>2</sub> с поверхности почвы, а также в усовершенствовании и верификации модели.

**Апробация работы.** Результаты и выводы основных частей работы были представлены на всероссийских и международных конференциях, среди которых можно отметить: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Международную конференцию «BIOGEOMON 2017», IV Всероссийскую конференции молодых ученых «Биоразнообразие: глобальные и региональные процессы» (Улан-Удэ, 2016), Всероссийскую научную конференцию «Научные основы устойчивого управления лесами» (Москва, 2014), III Всероссийской молодежной конференции «Перспективы развития и проблемы современной ботаники» (Новосибирск, 2014), Международной научно-практической конференции «Наука — инновационному развитию лесного хозяйства» (Гомель, 2015), X Международном симпозиуме «Баланс углерода, воды и энергии и климат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на Восточную Евразию» (Якутск, 2016), International conference “Climate Change constrains and opportunities in the Asian Pacific Region: Human-Biosphere-Atmosphere Interactions and Green Growth” (Владивосток, 2017), «SPARC 2018» (Kyoto, Japan), “ENVIRONMIS 2018” (Томск, Россия), EGU Assembly 2017, 2019 (Vienna, Austria), ISEB 2019 (Potsdam, Germany).

**Публикации.** Основные положения научной работы были опубликованы в материалах и сборниках всероссийских и международных конференций, а также 7 статей в изданиях из перечня ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и выводов. Текст работы изложен на 158 страницах, содержит 39 рисунков и 12 таблиц. Список использованной литературы содержит 217 источников, 174 из которых на английском языке.

**Благодарности.** За ценные советы, рекомендации и поддержку автор выражает огромную благодарность А.С. Прокушкину С.В. Верховцу, О.В. Меняйло, В.В. Шишову, Н.Н. Кошурниковой, И.И. Тычкову, А.В. Урбан, А.В. Рубцову и Д.А. Полосухиной. Автор также признателен коллективу Лаборатории биогеохимических циклов Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН за помощь в отборе, транспортировке образцов и установке экспериментальных конструкций. Автор благодарит коллектив станции высотной мачты «ZOTTO» за неоценимую поддержку в проведении полевых работ в течение всех измерительных сезонов, особенно при работе на экспериментальных участках. Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории биогеохимии экосистем и Кафедры экологии и

природопользования Института экологии и географии ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» за ценные комментарии и советы при работе над диссертацией.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Краткий обзор работ по почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>.

Рассмотрены особенности развития и функционирования лесов бореальной зоны, а также их роль в контексте глобальных климатических изменений. Отмечается, что бореальные леса наиболее чувствительны к внешним воздействиям, и, как прогнозируется, потепление климата наиболее сильно отразится на функционировании экосистем северных широт (Houghton et al., 1990; IPCC, 2007). Существует также потенциально высокая положительная обратная связь между ростом температуры и эмиссией CO<sub>2</sub> из почв бореальной зоны (Lashof, 1989; Goulden et al., 1998). Однако текущие оценки почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> варьируют в широких пределах, что вызвано как сложностью процессов почвенного дыхания и их взаимодействия с окружающей средой, так и существенными различиями в оценочных подходах. Текущие оценки глобальной величины почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> составляют порядка 80 Гт в год (Reich, Schlesinger, 1992), из которых значительная часть приходится на леса Сибири (Шульце и др., 1999).

Главными внешними климатическими факторами, определяющими почвенную эмиссию, являются температура и влажность почв. Основной объем исследований на сегодняшний день сосредоточен на температурной чувствительности дыхания почвы -  $R_s$  (Lloyd and Taylor, 1994; Boone et al., 1998; Davidson et al., 1998; Buchmann, 2000). Однако влажность почвы может влиять на  $R_s$  нелинейно, ограничивая корневую и микробную активность в почве при низких уровнях влажности почвы и коэффициент диффузии CO<sub>2</sub> – при высоких уровнях влажности почвы (Orchard and Cook, 1983; Maier et al., 2010).

Оценки  $R_s$  в масштабе экосистемы традиционно осуществляются двумя способами. Точечные измерения часто «масштабируются» посредством процесса простого умножения, в результате чего измерения на единицу площади умножаются на репрезентативные области всей экосистемы (например, Crill, 1991; Norman et al., 1992; Ryan et al., 1997; Lavigne et al., 1997). Также интегрированные по ландшафту измерения могут быть получены методом микровихревых пульсаций в ночное время (например, Goulden et al., 1996; Grace et al., 1995). Однако данные полученные этими двумя методами, часто не согласуются (Goulden et al., 1996; Lavigne et al., 1997).

Связи между атмосферным CO<sub>2</sub> и глобальным повышением температуры вызвали необходимость оценивать будущее развитие биосферных потоков и пулов углерода. Помимо экспоненциальной модели или уравнения Аррениуса (Lloyd and Taylor, 1994; MacDonald et al., 1995; Thierron and Laudelout, 1996), реакции дыхания почвы и других процессов

минерализации в почве на температуру описываются различными типами моделей: линейные модели (Rochette et al., 1991); квадратичные модели (Holthausen and Caldwell, 1980); логистические модели (Schlentner and Van Cleve, 1985; Jenkinson, 1990); модели с использованием временного эквивалента температуры (Feng and Li, 1997). Несмотря на то, что эти модели были успешными при интерпретации данных, полученных отдельными исследователями при определенных обстоятельствах, они предлагают разные объяснения реакции дыхания почвы на температуру.

## **Глава 2. Физико-географическая характеристика района исследования**

Район исследования находится в пределах Кеть-Сымской низменности на левобережье Енисея – это часть Западно-Сибирской низменности с пологоувалистой заболоченной поверхностью. Краевая часть Кеть-Сымской низменности, примыкающая к Енисею, представляет собой замкнутое понижение, именуемое Тугуланской котловиной (Глебов, 1988 и др.). В орографическом плане район расположен в пределах северо-западных предгорий Енисейского кряжа, в подзоне средней тайги. Важным фактором распределения растительных сообществ в данном районе является уровень грунтовых вод, определяющий степень увлажнения местообитаний.

Климат отличается континентальностью. Согласно агроклиматическому районированию, это умерено холодный район с достаточным увлажнением: сумма температур выше 10°C составляет 800-1200°, ГТК 1.2-1.6 (Лесные экосистемы, 2002). Среднегодовая температура воздуха составляет -3,7 °С. Средняя минимальная температура воздуха -48 °С, средняя максимальная температура 31 °С. Абсолютная минимальная температура воздуха -54 °С, абсолютная максимальная температура 36 °С. Амплитуда колебания среднемесячных температур 41.9 °С.

Выпавшие в течение года атмосферные осадки по сезонам распределяются неравномерно. Так, за апрель-октябрь, в результате развития циклонической деятельности, выпадает более 70% от общего количества осадков. Максимум их приходится на июль–август. Среднегодовая относительная влажность воздуха 76 %. Сумма атмосферных осадков 590 мм за год.

В районе исследования с 1936 года среднегодовая температура воздуха увеличилась на 3.2 °С. Самым теплым был 2015 год, когда среднегодовая температура составила -0.5 °С. Отличительной чертой последнего десятилетия стала высокая вариабельность в количестве осадков, которая между отдельными годами достигала 350 мм.

## **Глава 3. Измерение и анализ эмиссионных потоков CO<sub>2</sub> из почвы**

*Характеристика экспериментальных участков.* Измерения почвенной эмиссии проводились в период с июня по сентябрь включительно, в течение пяти сезонов: 2012, 2013, 2015, 2016 и 2017 гг., в экосистемах с разными

типами напочвенного покрова: сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный, смешанный лес и нарушенный участок после антропогенного вмешательства, представленный голой песчаной почвой без напочвенного покрова (Махныкина и др., 2016).

*Измерения почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>.* Измерения величины потока почвенного дыхания проводились с помощью автоматизированной системы по измерению потоков CO<sub>2</sub> с поверхности почвы на основе инфракрасного газового анализатора LI-8100A (Li-cor Biogeosciences Inc., США). При изучении сезонной динамики измерения почвенного дыхания проводились один раз в сутки, с 11:00 до 16:00, с различной периодичностью для каждого участка, но не менее пяти раз в месяц. В случаях, когда влажность воздуха превышала 90%, измерения не осуществлялись ввиду большой погрешности в получаемых данных. Измерения проводились в трех повторностях, время измерения - 2 минуты, с промежутком между измерениями 20 секунд. Частота измерений была определена экспериментальным путем через установление зависимостей между величиной ошибки и средним месячным значением эмиссии CO<sub>2</sub> (Махныкина и др., 2016).

*Мониторинг температуры и влажности почвы.* Измерения температуры почв осуществлялось на трех глубинах – 5, 10 и 15 см от поверхности почвы. Данная глубина характеризуется максимальными запасами органического вещества и высокой биологической активностью. Измерения температуры проводились с использованием почвенного температурного датчика Soil Temperature Probe Type E (Omega, США). Влажность почв измерялась на глубине 5 см от поверхности почвы с помощью влагомера Theta Probe Model ML2 (Delta T Devices Ltd., Великобритания).

*Отбор образцов почв и растительности.* На каждой пробной площади и под каждым измерительным кольцом после завершения сезона инструментальных наблюдений были отобраны почвенные образцы. Они отбирались до глубины 50 см методом монолита, размер которого составлял 10\*10 см. Отдельно были взяты образцы живого напочвенного покрова и древесного опада.

Максимальным содержанием углерода в почве характеризуется участок со смешанным лесом: запасы углерода на 15% выше, чем в сосняке лишайниковом и в 2 раза выше, чем в сосняке зеленомошном и на нарушенном участке, что обуславливает его высокое биоразнообразие и присутствие в составе древостоя нескольких лесообразующих пород.

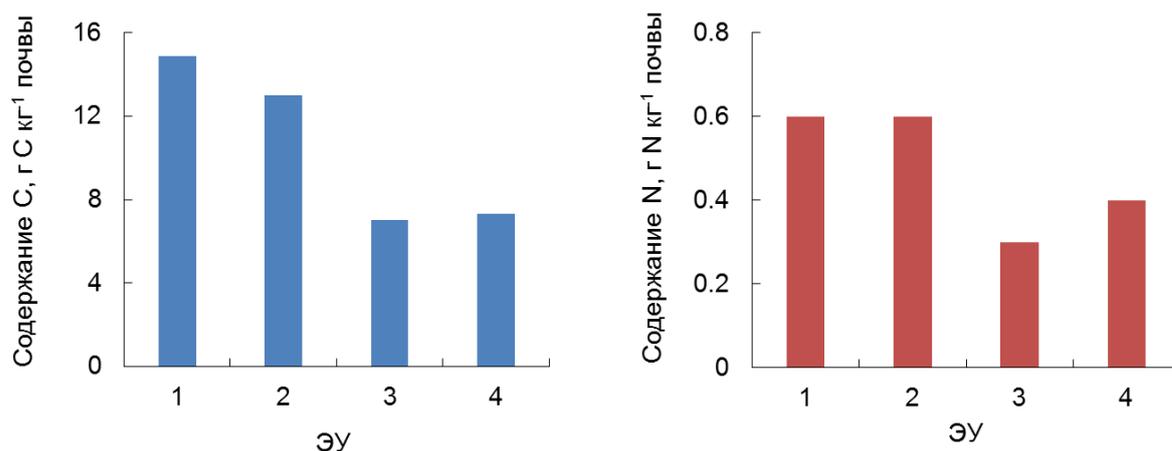


Рисунок 1. Содержание углерода (C) и азота (N) в почве до глубины 50 см на ЭУ (экспериментальных участках): (1) сосняк лишайниковый, (2) сосняк зеленомошный, (3) смешанный лес, (4) нарушенный участок без напочвенного покрова.

Содержание азота в почве, как важного элемента минерального питания растений, в значительной степени лимитирует не только ростовые процессы растений, но и биологическую активность почвенной биоты. Сосняк лишайниковый и смешанный лес обладают сходными запасами почвенного азота ( $0.6 \pm 0.1$  г N кг<sup>-1</sup> почвы). В сосняке зеленомошном содержание азота на 50% ниже, а на нарушенном участке – на 33%.

#### Глава 4. Пространственно-временная изменчивость почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>

*Суточный ход почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>.* Измерения суточной эмиссии потоков CO<sub>2</sub> с поверхности проводились все пять измерительных сезонов. В 2012 году были рассмотрены участки с разными типами напочвенного покрова – сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный и смешанный лес. По климатическим характеристикам год был очень засушливым (количество осадков за летний период составило 54% от среднегодовой нормы), что непосредственно отразилось на изменении почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> в течение суток в разные промежутки сезона.

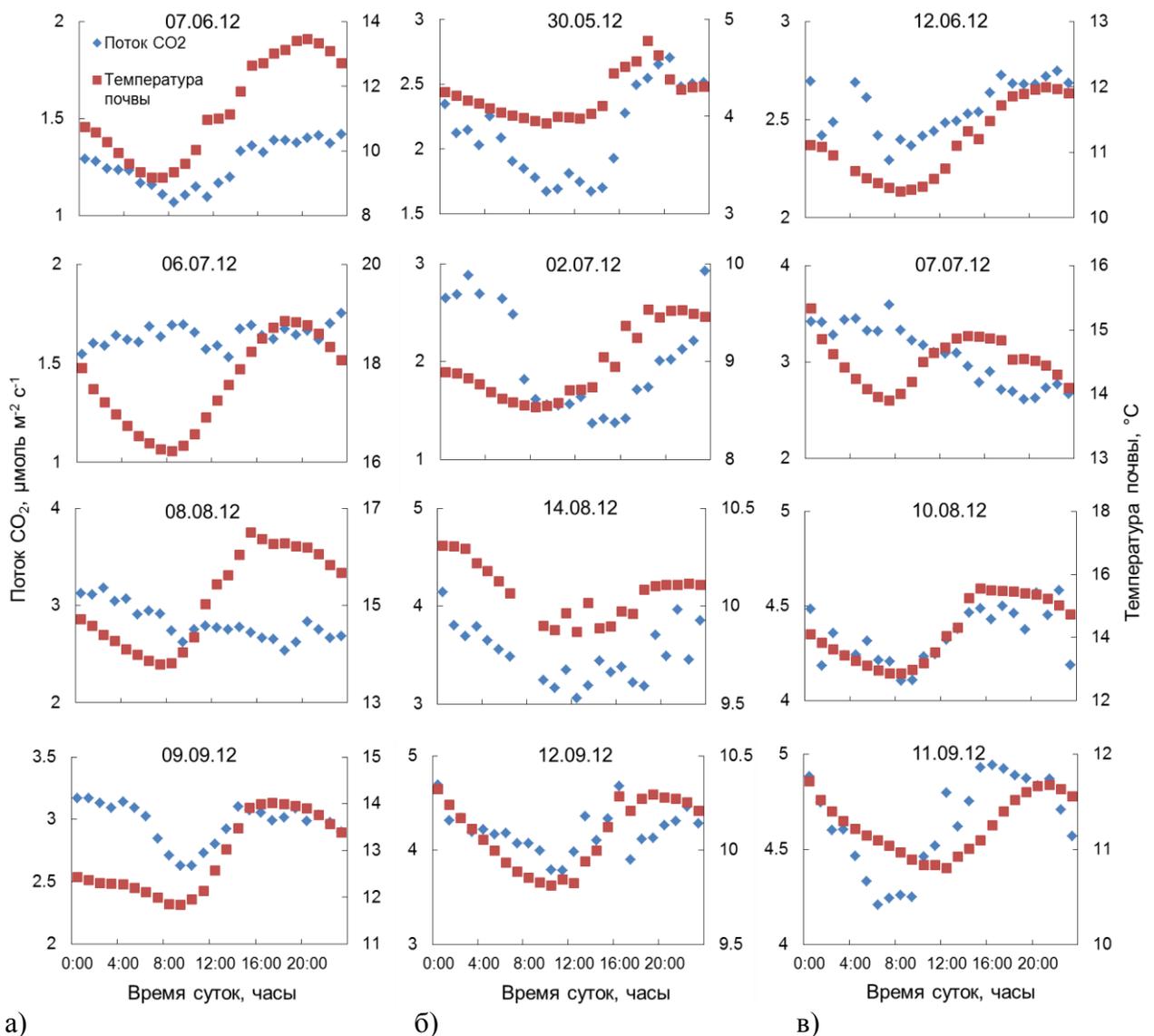


Рисунок 2. Суточный ход почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  и температуры почвы для участков с разными типами напочвенного покрова: (а) сосняк лишайниковый, (б) сосняк зеленомошный, (в) смешанный лес.

Суточная динамика в течение сезона демонстрирует заметное изменение связи между почвенной эмиссией и температурой почвы. В начале сезона довольно четко прослеживается корреляция потоков с температурой, однако с 15 июня наблюдается ослабление связи. Исключение составляет сосняк зеленомошный, в котором на всем протяжении сезона преобладающим фактором, регулирующим эмиссию, остается температура.

В работе С. Миядзакис с соавторами (2014) отмечено, что зависимость почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  от температуры и влажности почв может изменяться в течение вегетационного сезона. Изучение влияния температуры и влажности почвы было рассмотрено для участка сосняка лишайникового в течение разных по условиям увлажнения сезонов – засушливого (2012) и переувлажненного (2015). Температура почв в засушливый год контролирует потоки почвенной эмиссии, однако не на всем протяжении сезона, как отмечалось ранее. Переувлажненный год характеризуется сходными

закономерностями, но, в отличие от засушливого сезона, в середине вегетационного периода (вторая половина июля – середина августа) наблюдается противоход суточной динамики температуры почвы и почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  после полудня (после 12:00). В засушливый сезон 2012 года отмечалось уменьшение эмиссии в дневные и вечерние часы.

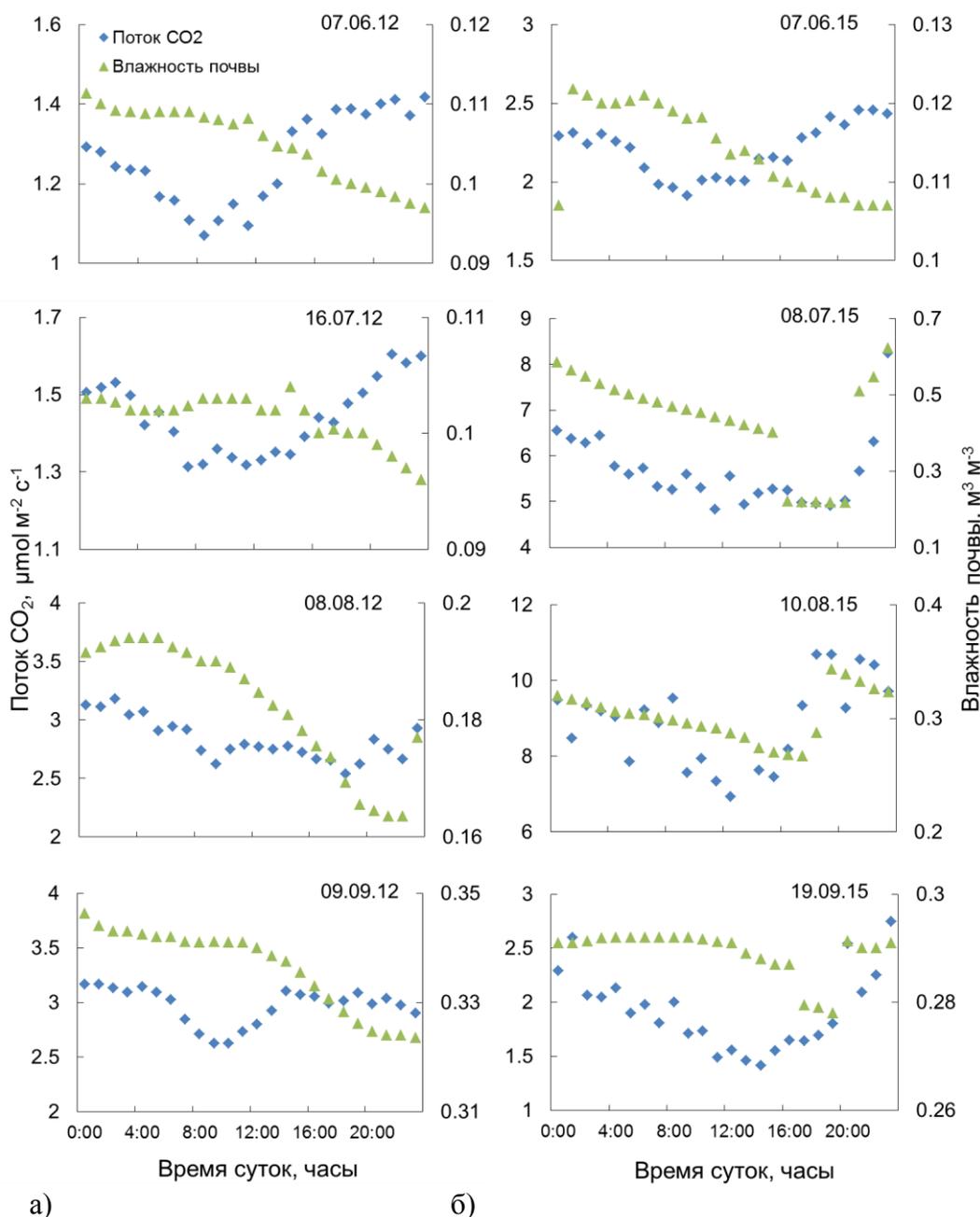
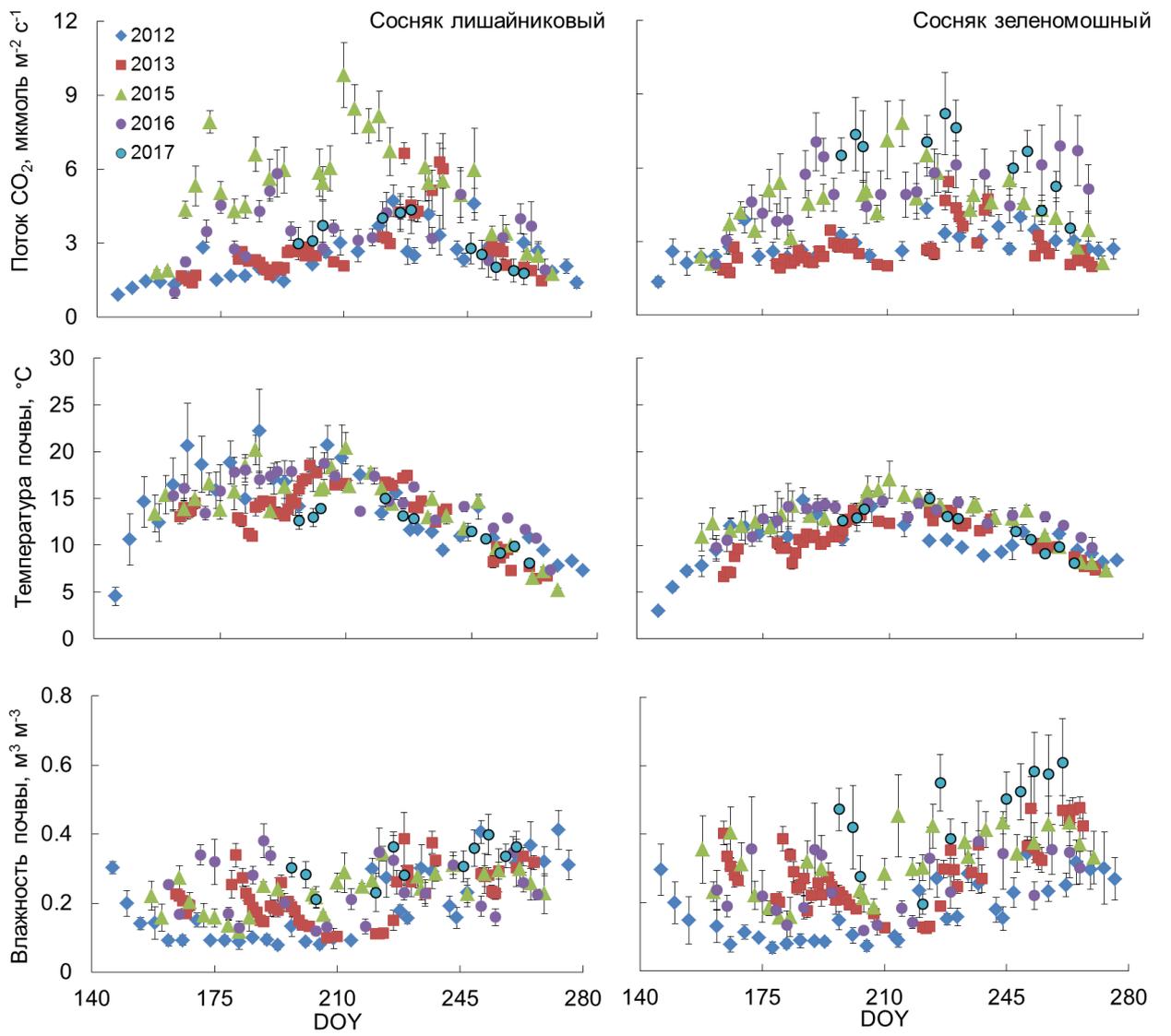


Рисунок 3. Суточный ход почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  и влажности почвы в сосняке лишайниковом для двух сезонов – 2012 (а) и 2015 (б).

Динамика почвенной эмиссии и влажности почв в течение сезона носит закономерный характер, вне зависимости от условий увлажнения. В начале сезона можно констатировать обратную связь между потоком  $\text{CO}_2$  из почвы и ее влажностью: при уменьшении влажности почв почвенная эмиссия увеличивается. В середине вегетационного сезона (июль-середина августа)

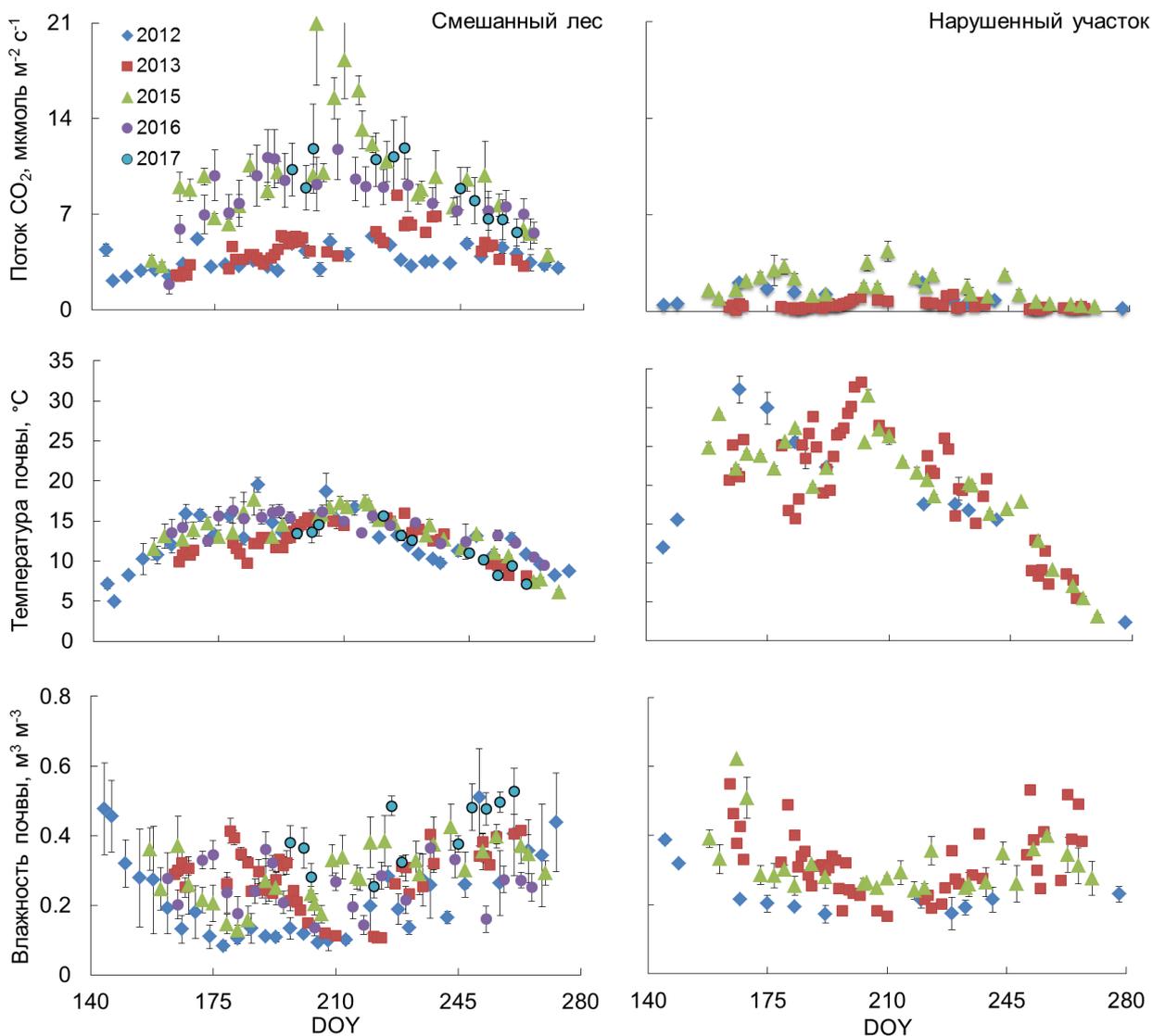
прослеживается зависимость между почвенной влажностью и потоком  $\text{CO}_2$ . Исключение составляет засушливый сезон (2012), когда с уменьшением влажность поток стал расти, что объясняется большей температурной чувствительностью в этот сезон и для данного участка. В конце сезона достоверная зависимость между влажностью почв и почвенной эмиссией не отмечена.

*Сезонная динамика почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ .* Сезонный ход почвенной эмиссии имеет ряд характерных особенностей для всех изученных участков: максимальные потоки приходятся на конец июля – начала августа. Величина потоков определяется гидротермическими условиями конкретного участка и метеорологическими условиями сезона. Для лесопокрываемых участков в засушливые годы пик потоков приходится на период с максимальным количеством осадков (начало и конец сезона). В переувлажненный сезон (2015 г.), напротив, максимальные потоки отмечаются при снижении количества осадков. Сходные закономерности распределения величин почвенной эмиссии были получены для смешанных лесов Франции (G. Vincent et al., 2006), когда пик потоков приходился на начало и конец сезона, что было обусловлено условиями увлажнения территории (переувлажненный сезон). В сезоны со средним количеством осадков динамика эмиссионных потоков коррелирует с динамикой температуры почвы. На нарушенном участке такие закономерности не наблюдаются. Во все сезоны измерений рост потоков вызван ростом температуры почвы, в том числе в засушливые периоды.



a)

б)



в) г)  
 Рисунок 4. Поток CO<sub>2</sub> с поверхности почвы, температура и влажность почв для 5 лет измерений с участков с различными типами напочвенного покрова: (а) сосняк лишайниковый, (б) сосняк зеленомошный, (в) смешанный лес, (г) нарушенный участок.

*Межгодовая изменчивость почвенной эмиссии. Сравнимые года различались по метеорологическим условиям вегетационного периода.*



Рисунок 5. Метеорологические характеристики сезона (июнь-сентябрь) за 5-летний период наблюдений в сравнении со среднемноголетними значениями по метеостанции Бор (1936-2017 гг. – по температуре воздуха и с 1966-2017 гг. – по количеству осадков). Данные по температуре воздуха приведены со стандартными ошибками.

Среди рассмотренных сезонов по степени увлажнения существенно различались 2012 и 2015 гг. Важно отметить, что влажность песчаных почв, при которой возможно нормальное функционирование биологических процессов, составляет не менее 5% (wilting point). В 2012 г. количество дней с влажностью более 5% было в 2 раза меньше, чем в 2015 г. Рост количества осадков в 2012 г. начался только в конце сезона (со второй половины августа).

Дефицит осадков в отдельные годы привел к различиям в суммарной почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ . Максимальная сезонная эмиссия отмечена в 2015 г. и в среднем составляет  $0.74 \pm 0.1 \text{ кг С м}^{-2}$ . В сезоны с недостаточным увлажнением – 2012, 2013 гг. – почвенная эмиссия составила, в среднем,  $0.36 \pm 0.03 \text{ кг С м}^{-2}$ , что на 43% меньше, чем в другие сезоны. В 2016 г. почвенная эмиссия равнялась  $0.58 \pm 0.1 \text{ кг С м}^{-2}$  и мало отличалось от почвенной эмиссии в 2017 г. ( $0.65 \pm 0.12 \text{ кг С м}^{-2}$ ).

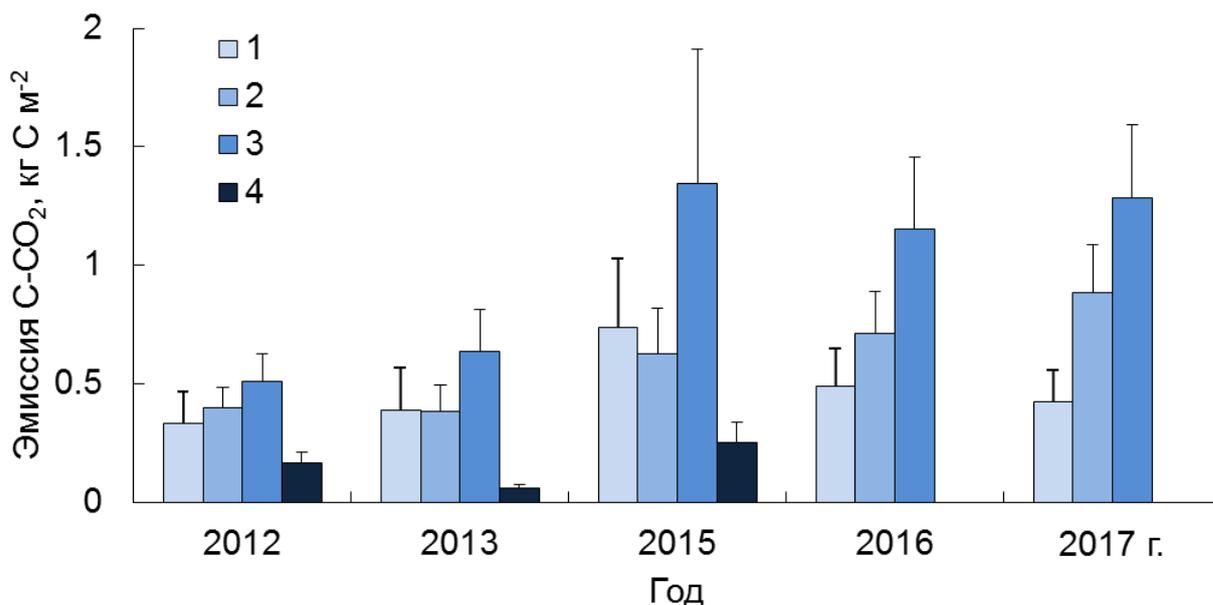


Рисунок 6. Поток  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы за сезон измерений в 2012-2017 гг. Данные представляют собой суммарный поток со всех участков за вегетационный сезон, приведены со стандартным отклонением. Цифрами обозначены участки: 1 – сосняк лишайниковый, 2 – сосняк зеленомошный, 3 – смешанный лес, 4 – нарушенный участок.

С учетом этих фактов можно утверждать, что, при прочих равных условиях, различия в температуре значительно определяют суммарную величину почвенной эмиссии.

### Глава 5. Зависимость почвенной эмиссии $\text{CO}_2$ от факторов среды

*Температура и влажность почвы.* Эффект температуры на почвенную эмиссию, как правило, описывается экспоненциальной функцией (Lloyd, Taylor, 1994; Kirschbaum, 2000). Эффект влажности почвы описан большим количеством функций и уравнений, включая линейную, логарифмическую и параболическую функции (Scott-Denton et al., 2003; Peng et al., 2008). Установлено, что, в зависимости от метеорологических условий вегетационного сезона, сила воздействия факторов на почвенную эмиссию будет существенно меняться. В сухие сезоны фактор влажности будет оказывать лимитирующее и модифицирующее воздействие на формирование потока почвенной эмиссии.

В работе предложен алгоритм разделения измерений за пять сезонов на две группы, отличающихся по условиям увлажнения, в которых в дальнейшем рассматривалась зависимость почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  от фактора «температура почвы».

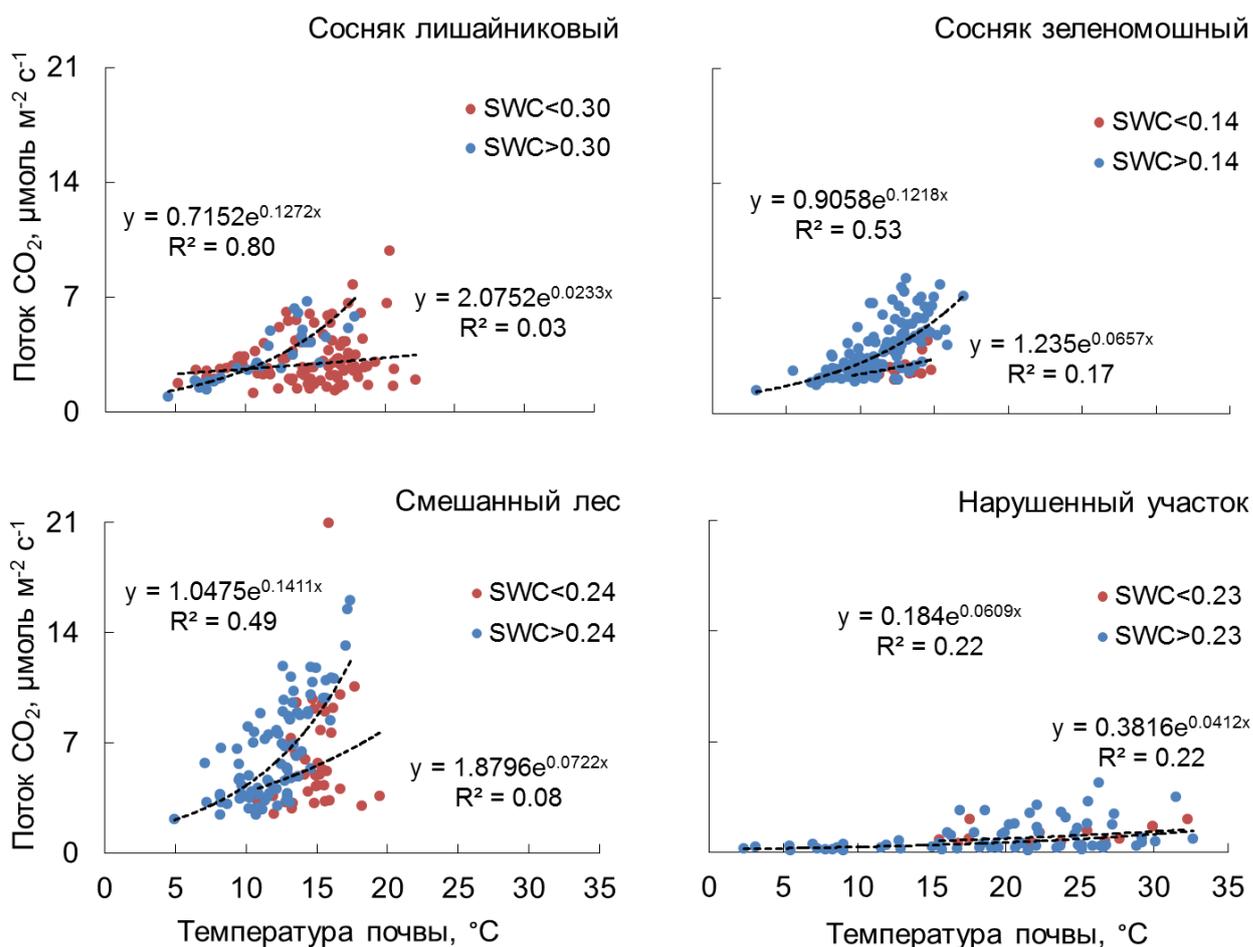


Рисунок 7. Зависимость почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> от температуры почвы для двух групп по влажности почв (SWC – содержание воды в почве) на участках с разными типами растительного покрова: сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный, смешанный лес, нарушенный участок.

Установлена пороговая влажность (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), или оптимальные условия увлажнения, для каждого типа экосистем: 0.30 – для сосняка лишайникового, 0.14 – для сосняка зеленомошного, 0.24 – для смешанного леса и 0.23 - для нарушенного участка. Скорости почвенной эмиссии в сосняке лишайниковом, сосняке зеленомошном и смешанном лесу, где влажность превосходит пороговую на 8, 25 и 14% соответственно, выше, чем в группах, лимитированных по условиям увлажнения (рис.6). Для участка с нарушенным напочвенным покровом не прослеживается четких различий для двух выделенных нами групп.

Для двух выделенных групп был рассчитан Q<sub>10</sub> (рис. 7), который показывает, насколько сильно условия увлажнения в течение сезона меняют температурную чувствительность скорости почвенной эмиссии.

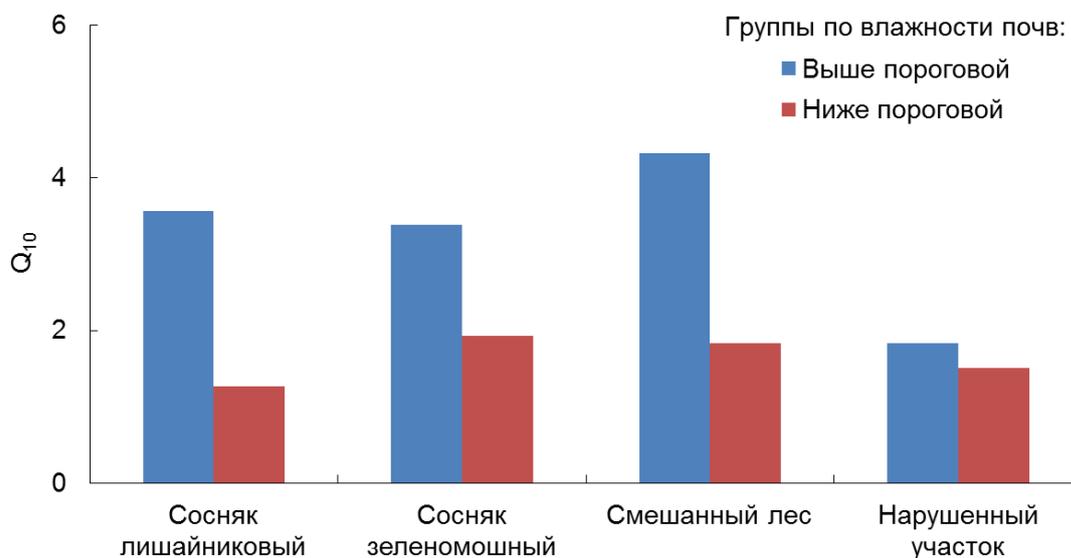


Рисунок 8. Коэффициент  $Q_{10}$  рассчитанный для участков с разными типами растительного покрова. Данные приведены для двух групп по влажности почв.

Для группы с влажностью выше порогового значения наибольшей величиной  $Q_{10}$  характеризуется смешанный лес ( $Q_{10}=4.3$ ). Коэффициент  $Q_{10}$  в сосняках лишайниковом и зеленомошном сходны по величине и составляют 3.6 и 3.4 соответственно. На нарушенном участке (без растительного покрова) величина  $Q_{10}$  варьировала, в зависимости от года, от 1.5 до 1.8. Полученные значения  $Q_{10}$  для данного участка близки к литературным оценкам для гетеротрофов ( $Q_{10}=2$  (Czimczik et al., 2009)), что подтверждает именно гетеротрофное происхождение выделяемого  $CO_2$ .

В засушливые годы температурная чувствительность у всех лесопокрываемых участков находится на одном, существенно более низком уровне ( $Q_{10}=1.9$ ). Данный факт может свидетельствовать об уменьшении вклада корней (автотрофного звена) в общую почвенную эмиссию  $CO_2$  при низкой влажности почв, а также проявлением снижения активности почвенных микроорганизмов.

*Роль осадков.* Экспериментальные работы по внесению дифференцированного количества осадков проводились в течение вегетационного сезона (июнь-сентябрь) в 2015 и 2016 годах. Были выбраны 4 уровня по количеству осадков – 0%, 25%, 50% и 100% (естественные условия увлажнения) от выпавшего количества осадков.

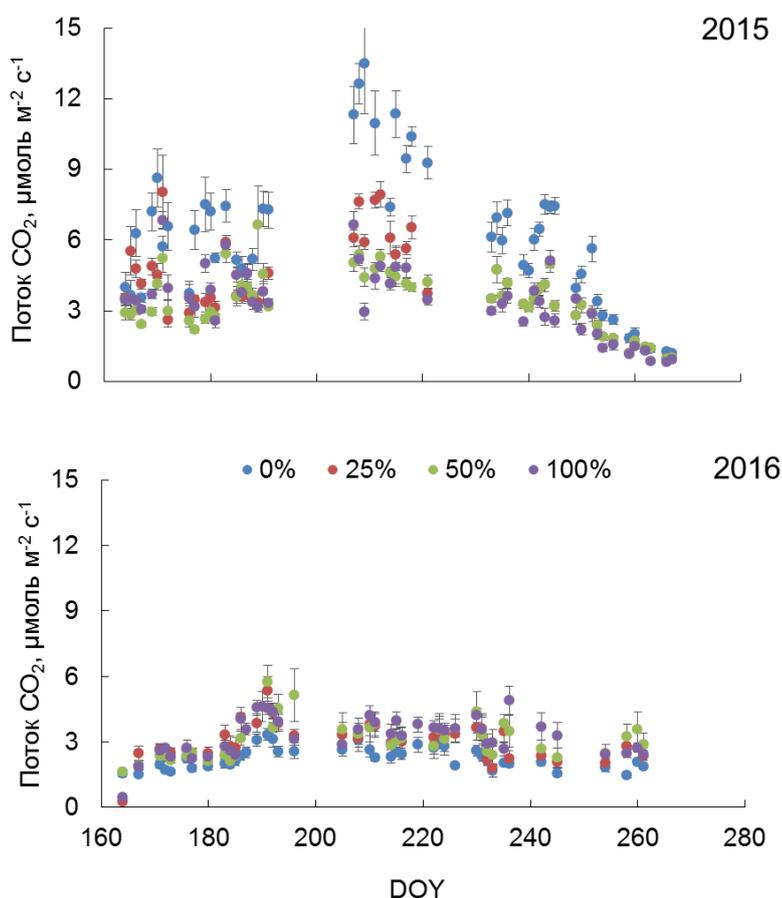


Рисунок 9. Сезонная динамика почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  для двух сезонов проведения эксперимента. Данные представляют собой среднесуточные значения со стандартными ошибками.

Рассматриваемые периоды продемонстрировали диаметрально противоположную реакцию почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  на дифференцированное количество осадков. Изменение в их количестве может уменьшать (при значительных количествах) или увеличивать (оптимальные условия увлажнения) скорости потоков  $\text{CO}_2$  из почвы.

Метеорологические характеристики почвы в течение сезона могут различно участвовать в формировании почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ . В ходе эксперимента были определены оптимальные условия увлажнения, при которых поток  $\text{CO}_2$  наиболее сильно зависел от температуры почв, т.е. не наблюдалось лимитирования по влажности почвы.

## Глава 6. Моделирование сезонного потока почвенной эмиссии $\text{CO}_2$

*Параметризация экспоненциальной модели.* Модификации экспоненциальной модели почвенной эмиссии способствовали несколько предпосылок: (1) представленные в литературе данные о нелинейном характере зависимости потока  $\text{CO}_2$  от влажности почв; (2) результаты собственных экспериментов; (3) значительные расхождения линейной модели влияния влажности на эмиссию  $\text{CO}_2$  с результатами прямых измерений.

После изучения существующих моделей почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  (модель Аррениуса, модель Ллойда-Тейлора, модель  $Q_{10}$ , модель Мильника-Дугаса) было решено усовершенствовать экспоненциальную модель изменения почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  с ростом температуры, добавив параметр, характеризующий изменения влажности почв:

$$E = E_0 * (\beta_0 + \beta * \text{SWC}) * e^{(\alpha * T_s)}, \text{ где}$$

$E_0$  – начальное значение потока,  $\beta_0$  – начальное значения влажности почв  $\alpha$  – нормирующий коэффициент температуры почвы на глубине 8 см,  $\beta$  – нормирующий коэффициент влажности почвы на глубине 8 см. Коэффициенты модели  $E_0, \beta, \alpha$  были определены с использованием метода наименьших квадратов. Параметрам  $E_0, \beta, \alpha$  присваивались различные положительные действительные значения, и параметризация завершилась, когда сумма квадратов отклонений измеренных потоков  $\text{CO}_2$  и моделируемых  $E_{\text{CO}_2}$  достигла минимально значения. Установленная ранее пороговая, или оптимальная, влажность, специфическая для каждого типа экосистем, использовалась в качестве начального значения влажности почв при моделировании потоков сезонной эмиссии  $\text{CO}_2$ .

Значения температуры почв ( $T_{\text{soil}}$ ) и влажности почв (SWC) были взяты с измерительной eddy-covariance станции с глубины 8 см и пересчитаны для четырех типов напочвенного покрова: сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный, смешанный лес (рис. 10), нарушенный участок сосняка лишайникового. Процедура параметризации проводилась для каждого сезона измерений и каждого типа напочвенного покрова.

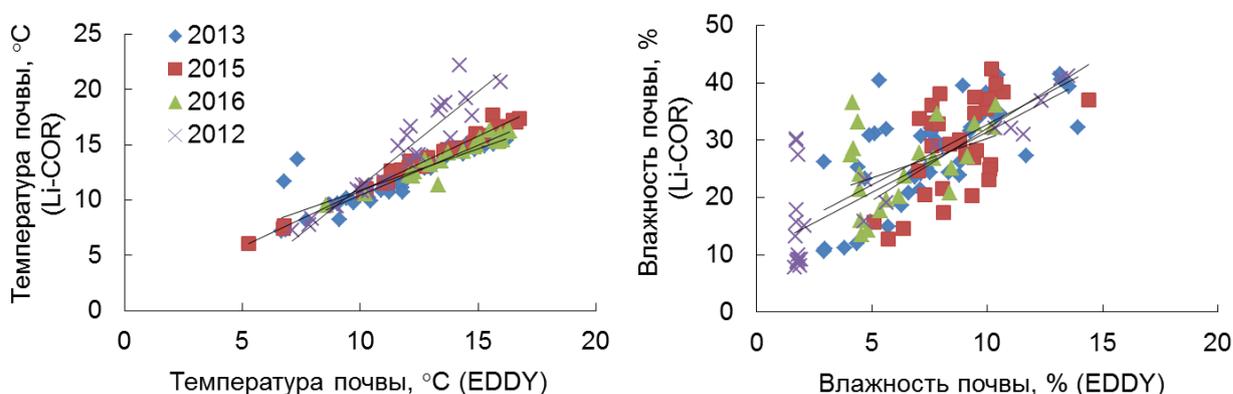


Рисунок 10. Смешанный лес. Пересчет данных по температуре и влажности почв, взятых с измерительной eddy-covariance (EDDY) станции, и значений, измеренных с помощью Li-Cor 8100A (Li-COR): а) температура почв ( $T_{\text{soil}}$ ); б) влажность почв (SWC).

*Моделирование эмиссионных потоков почвенного  $\text{CO}_2$ .* Разработанная модель хорошо описывает тенденции изменения почвенной эмиссии в течение сезона для сезонов с разным количеством осадков (рис. 11). Добиться такого результата позволило включение влажности как второго фактора среды (помимо температуры), описывающего изменения почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ . Максимальное расхождение с прямыми измерениями потока

CO<sub>2</sub> за все измерительные сезоны составило 50% и наблюдалось единоразово в сезоне – во второй половине июля – начале августа.

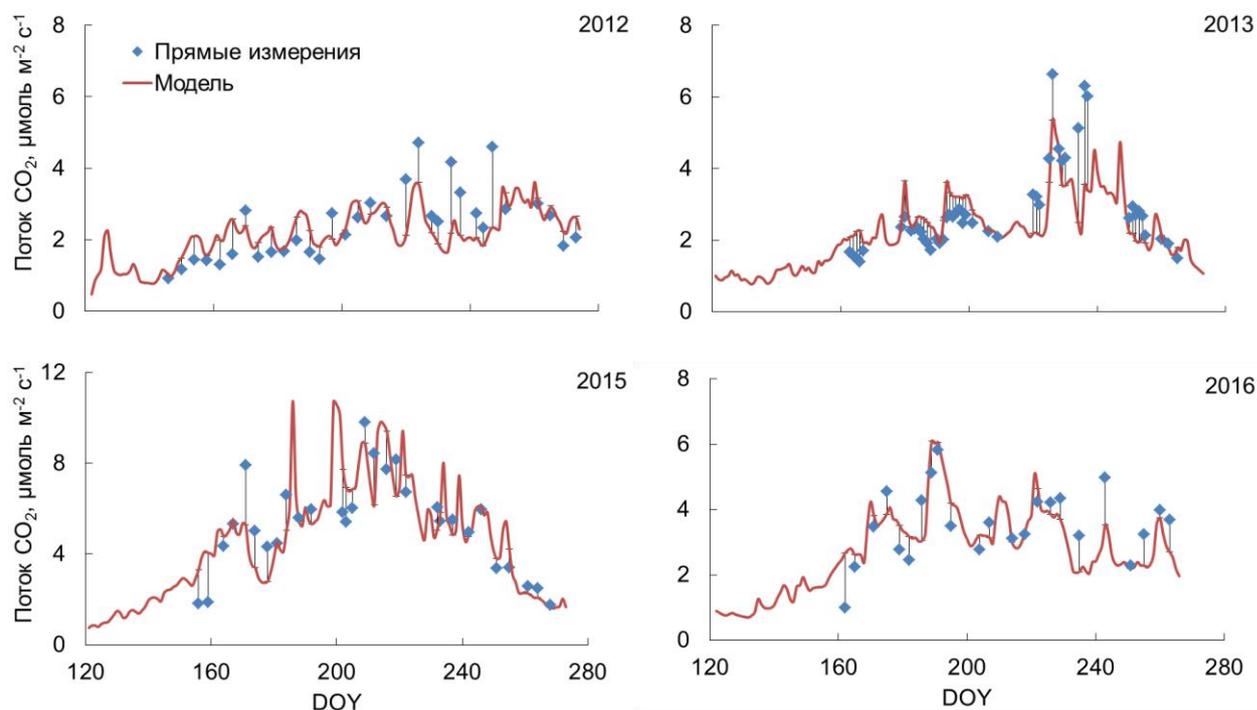


Рисунок 11. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> разных сезонов для сосняка лишайникового. Представлены результаты моделирования по экспоненциальной модели почвенной эмиссии с использованием температуры и влажности почвы. На рисунках обозначены отклонения модельных значений от величин прямых измерений почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>.

Экспоненциальная модель, учитывающая только температуру почвы – модель (Т) – не описывает сезонную динамику почвенной эмиссии и не достигает значений экстремумов, что визуально можно проследить на рисунке 12. Данная тенденция сохраняется для всех лесопокрываемых участков, однако нарушенный участок демонстрирует другие результаты. На участке без напочвенного покрова модель с использованием только температуры достоверно описывает сезонную динамику почвенной эмиссии, исключение составляет лишь период с максимальным развитием потоков CO<sub>2</sub> с поверхности почвы. Выделенная особенность подчеркивает значимость дифференцированного влияния напочвенного покрова на формирование сезонной почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>.

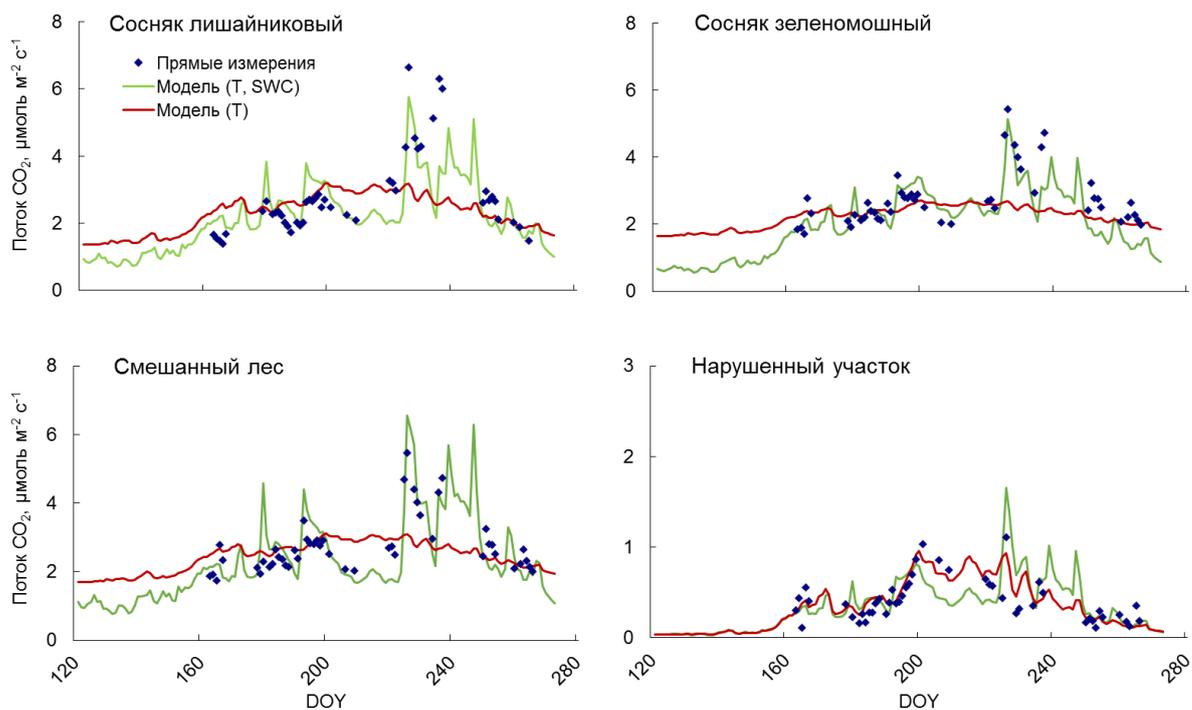


Рисунок 12. Сезонная динамика почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  для 2013 года на участках с разными типами напочвенного покрова: сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный, смешанный лес, нарушенный участок без напочвенного покрова. Представлены результаты моделирования по двум моделям: красная линия – экспоненциальная модель почвенной эмиссии с использованием температуры почвы; зеленая линия – экспоненциальная модель почвенной эмиссии с использованием температуры и влажности почвы.

Предложенная модель измерения почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ , включающая действие двух основных для вегетационного сезона факторов – температуры и влажности почвы – наиболее точно описывает изменения в ходе почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  в течение вегетационного сезона при рассмотрении участков с разными типами напочвенного покрова и в сезоны, отличающиеся по степени увлажнения. Нет сомнения, что модель может быть использована при масштабировании потоков  $\text{CO}_2$  для значительных пространственных участков.

### Выводы:

1. Тип экосистемы влияет на почвенную эмиссию  $\text{CO}_2$ : величина эмиссии в смешанном лесу в 2 раза превышает эмиссии в сосняках лишайниковом и зеленомошном, нарушенный участок характеризуется наименьшей эмиссией (менее 10% от величин почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ , зафиксированных на лесопокрытых участках).
2. Суточная динамика почвенной эмиссии в начале и в конце вегетационного сезона контролируется температурой почвы, в середине вегетационного сезона – условиями увлажнения.
3. Суммарная величина почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$  за вегетационный период определяется условиями его увлажнения. Для засушливых лет пик

сезонной эмиссии CO<sub>2</sub> приходится на 2 периода: начало и конец вегетационного сезона. В годы с достаточным увлажнением – на середину вегетационного сезона.

4. Выделение порогового значения влажности почв позволяет оценить влияние температуры на эмиссионные потоки без лимитирования по условиям увлажнения в течение вегетационного сезона.

5. Температурная чувствительность почвенной эмиссии меняется при различных условиях увлажнения. В результате развития засухи температурная чувствительность у исследованных экосистем находится на одном существенно более низком уровне: в группе условно высокой влажности Q<sub>10</sub> на всех лесопокрытых участках характеризуется величинами в среднем на 55% выше, чем при дефиците влаги.

6. Разработана нелинейная регрессионная модель, включающая влажность почвы как дополнительный параметр в экспоненциальной модели почвенной эмиссии CO<sub>2</sub>, которая позволяет достоверно оценивать сезонную динамику эмиссии CO<sub>2</sub> и может быть использована в дальнейшем для восстановления эмиссионных потоков в экосистемах района исследований на основе данных непрерывного мониторинга температуры и влажности почв.

### **Список работ в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меняйло О.В., Верховец С.В., Тычков И.И., Урбан А.В., Рубцов А.В., Кошурникова Н.Н., Ваганов Е.А. Влияние климатических факторов на эмиссию CO<sub>2</sub> из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // Экология. – 2020 – № 1. Принято к печати.

2. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Ваганов Е.А., Верховец С.В., Рубцов А.В. Динамика потоков CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2016. – № 9(3) – С. 338–357.

3. Махныкина А.В., Верховец С.В., Кошурникова Н.Н. Воздействие нарушающих факторов различного происхождения на радиальный прирост в сосновых насаждениях Центральной Сибири // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2017. – № 4 – С. 476–482.

4. Махныкина А.В., Верховец С.В., Кошурникова Н.Н., Климченко А.В. Динамика запасов углерода в нарушенных сосновых насаждениях Средней Сибири // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. – 2013. – №19(4). – С. 20–24.

5. Makhnykina, A.V., Polosukhina, D.A., Koshurnikova, N.N., Verkhovets, S.V., Prokushkin, A.S. Influence of precipitation on CO<sub>2</sub> soil emission in pine forests of the Central Siberia boreal zone // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – № 211(1). – P. 012043.

6. Koshurnikova, N.N., Antamoshkina, O.A., Makhnykina, A., Zlenko, L.V., Verkhovets, S.V. Phytomass stock and structure in derivative forest stand of Central Siberia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2017. – № 17(32). – P. 907–914.

7. Makhnykina, A.V., Koshurnikova, N.N., Prokushkin, A.S., Vaganov, E.A., Tychkov, I.I. Dynamics of the soil CO<sub>2</sub> emission during snow-free period in the in middle taiga zone of Central Siberia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2018. – № 18(3.2). – P. 103–110.

8. Koshurnikova, N., Makhnykina, A., Garmash, A., Lyudmila Zlenko, L.V., Verkhovets, S. Production of phytomass carbon in the dark coniferous forest of the Western Siberia // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2018. – № 18(3.2). – P. 885–892.

Проведение работ по теме исследования было поддержано в рамках научных проектов: грант РФФИ №17-05-01257 «Воздействие лесных пожаров на потоки углерода в экосистемах подзоны средней тайги Средней Сибири» (исполнитель); № 18-34-00736 «Влияние основных лимитирующих факторов (количество осадков и содержание азота в почве) на эмиссию CO<sub>2</sub> из почвы в бореальных лесах Центральной Сибири».