

УДК 574.47

Dynamics of the CO₂ Fluxes from the Soil Surface in Pine Forests in Central Siberia

Anastasia V. Makhnykina^{*a},
Anatoly S. Prokushkin^b, Eugene A. Vaganov^a,
Sergey V. Verkhovets^a and Alexey V. Rubtsov^a

^aSiberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

^bV.N. Sukachev Institute of Forest
50/28 Akademgorogok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

Received 05.05.2016, received in revised form 21.05.2016, accepted 24.08.2016

In forest ecosystems, the CO₂ efflux from the soil may account for 40–80 % of the total amount of released CO₂. Domination carbon breath losses over productivity may change the functional role of the ecosystem and transform it from a carbon sink to source. One of the most important field of study in soil respiration research is to identify a uniform methodology for measuring CO₂ fluxes from the soil surface and its standardization. In our study, we assessed the investigation of the temporal and spatial dynamics of CO₂ flux from the soil surface using the method based on the dynamic closed chambers in the middle taiga forests of Central Siberia. Soil respiration measurements were carried out during the growing season from June to October 2013. The period, when the soil respiration reached to maximum development – the second half of July to the end of August 2013. The ground cover substantially affected the value of soil respiration. The smallest value observed at the site without any plant cover – pp_sand (0.11–1.24 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), which is 8 times lower than in the forested areas. The greatest values were attended at the site with mixed forest ranged from 2.31 to 8.41 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹. An important condition to obtain reliable results is the frequency of measurements. It was found that the measurements with a frequency of 5 or more times per month does not exceed the variation coefficient of 10 %, which indicates high reliability of the obtained values.

Keywords: carbon cycle, boreal forest, soil respiration, soil temperature, soil moisture, measurements frequency, LI-COR.

DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-3-338-357.

Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири

А.В. Махныкина^а, А.С. Прокушкин^б,
Е.А. Ваганов^а, С.В. Верховец^а, А.В. Рубцов^а

^аСибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

^бИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

В лесных экосистемах на поток CO₂ из почвы может приходиться 40–80 % от суммарного количества высвобожденного CO₂. Доминирование потерь углерода на дыхание над продуктивностью может изменить функциональную роль экосистемы и превратить ее из стока в источник углерода. Одним из наиболее важных направлений по изучению дыхания почвы считается выявление единой методики измерения потоков CO₂ с поверхности почвы и ее стандартизация. В нашей работе было проведено исследование сезонной и суточной динамики эмиссии CO₂ для разных типов подстилающей поверхности с использованием метода закрытых камер динамического типа (ДС-метод) в пределах среднетаежных лесов Сибири. Измерения почвенного дыхания проводились в течение вегетационного сезона с июня до октября 2013 г. Максимальные величины эмиссии CO₂ приходились на временной промежуток со второй половины июля по конец августа 2013 г. Наличие напочвенного покрова существенно влияет на величину почвенного дыхания. На участке без напочвенного покрова флуктуации потоков минимальные (0.11 – 1.24 μмоль CO₂ м⁻² с⁻¹), а их величина в среднем в 8 раз ниже, чем на лесопокрытых участках. Максимальные потоки CO₂ с поверхности почвы наблюдаются в смешанном лесу и варьируют от 2.31 до 8.41 μмоль CO₂ м⁻² с⁻¹. Важным условием для получения достоверных результатов является частота измерений. Установлено, что при измерениях с частотой пять и более раз в месяц коэффициент вариации не превышает 10 %, что свидетельствует о высокой достоверности полученных значений.

Ключевые слова: цикл углерода, бореальные леса, почвенное дыхание, температура почвы, влажность почвы, частота измерений, LI-COR.

В качестве неотъемлемого компонента цикла углерода дыхание почвы включает в себя суммарное количество углекислого газа, которое выделяется из почвы вследствие дыхания корней растений, почвенных микроорганизмов и микоризы (Vogken et al., 2002). Углерод почвы выступает одним из основных компонентов глобального баланса углерода и составляет 25 % от общего пула

CO₂ (Bouwmann et al., 1998). В лесных экосистемах на поток CO₂ из почвы может приходиться 40–80 % от суммарного количества высвобожденного CO₂ (Yuste et al., 2005; Joo et al., 2012). Запасы углерода в почве лесных экосистем и почвенном микробном сообществе находятся в динамическом равновесии с факторами окружающей среды. В целом, запасы почвенного органического углерода в

бореальных (296 Мг С га⁻¹) лесах значительно выше, чем в умеренных и тропических (122 мг С га⁻¹) (Lal, 2005). В результате эти леса по-разному реагируют на изменение климата и антропогенные воздействия (Powers et al., 2002). Доминирование потерь углерода на дыхание над продуктивностью может изменить функциональную роль экосистемы и превратить ее из стока в источник углерода (Oberbauer et al., 2007).

Почвенное дыхание считается надежным показателем для оценки общей биологической активности почвы. Установлено, что при интенсификации процесса почвенного дыхания увеличивается активность почвенной микробной биомассы и биомассы грибов, что, в свою очередь, ускоряет обмен питательных веществ и повышает агрегацию почвы (Dogan & Parkin, 1994). На протяжении десятилетий развития почвенной микробиологии такой показатель, как интенсивность эмиссии CO₂ с поверхности почв, использовали лишь для оценки их биологической активности и плодородия земледельческих районов Евразии и Америки. Ввиду основной роли в потере углерода экосистемами количество исследований в области почвенного дыхания в последнее время существенно увеличилось (Borken et al., 2002; Bond-Lamberty et al., 2004; Yuste et al., 2005; Joo et al., 2012; Oberbauer et al., 2007; Saiz et al., 2006; Lal, 2005). В результате расширилась и география исследований – большее внимание стало уделяться слабоосвоенным территориям Арктики и Субарктики.

Почвенный покров Российской Федерации играет главенствующую роль в глобальном углеродном цикле нашей планеты, однако современная оценка основных составляющих углеродного цикла отсутствует как для отдельных зон, поясов и регионов, так и для территории России в целом (Курганова и др., 2006). Согласно оценкам Международного

института прикладного системного анализа, территория России в 1990 г. (базовый год для стран – участниц Киотского протокола) выступала как источник CO₂ в размере 0.53 Гт С г⁻¹ (Nilsson et al., 2000). В соответствии с расчетами, проведенными в разное время в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Российская Федерация, напротив, являлась абсолютным стоком углерода в размере 0.81–1.10 Гт С г⁻¹ (Kurganova et al., 2008). **Неопределенность** величины углеродного баланса на территории России составляет не менее 50 %, поскольку оценки основных потоков углерода, формирующих его, имеют неопределенности от 5 до 40 % (Nilsson et al., 2000). Неоднозначные оценки баланса углерода на территории Российской Федерации, имеющиеся в литературе, требуют уточнения существующих величин баланса CO₂ на территории России.

Одним из наиболее важных направлений служит выявление единой методики измерения потоков CO₂ с поверхности почвы и ее стандартизация (Ryan, Law, 2005). Существуют различные методы по измерению почвенного дыхания. Методы на основе почвенных камер позволяют проводить измерения дыхания почвы на небольших территориях, исследуя пространственную изменчивость почвенного дыхания. Автоматизированные камерные системы обеспечивают непрерывные и полунепрерывные измерения для исследования динамики почвенного дыхания. Тем не менее измерения на основе камер могут создать некоторое смещение полученных значений при отборе проб, при резких изменениях атмосферного давления и изменении концентрации CO₂ в почве (Tang et al., 2005).

На текущий момент существуют исследования, в которых был проведен сравнительный анализ различных подходов по измерению почвенного дыхания. В одном из

них проверяли точность четырех методов: измерение потока CO₂ с использованием инфракрасного газоанализатора (OF – open flow метод); метода закрытых камер (CC – closed chamber метод); метода закрытых камер динамического типа (DC – dynamic chamber метод); метода щелочного поглощения (AA – alkali absorption метод). В результате проведенной работы выявлено, что для получения максимально корректных значений потока CO₂ из почвы необходимо поддерживать одинаковую концентрацию CO₂ внутри и снаружи камеры. AA-метод, при котором на продолжительное время изолируется поверхность почвы, значительно уменьшает итоговые значения почвенного дыхания и не подходит для изучения почвенного дыхания в естественных условиях. Доказано, что OF-, CC-, DC-методы являются наиболее подходящими для измерения почвенного дыхания, поскольку в меньшей степени воздействуют на количественные значения потока CO₂ из почвы (Vekku et al., 1997).

Основной целью в нашей работе было исследование сезонной и суточной динамики эмиссии CO₂ для разных типов подстилающей поверхности с использованием метода закрытых камер динамического типа (DC-метод) в пределах среднетаежных лесов Сибири. Основные задачи: 1) оценить пространственное варьирование эмиссии CO₂ в разных типах леса; 2) изучить временную динамику потоков CO₂ с поверхности почвы; 3) выделить факторы среды, определяющие поток CO₂ с поверхности почвы; 4) оценить влияние частоты измерений на достоверность месячных и сезонных значений потоков CO₂.

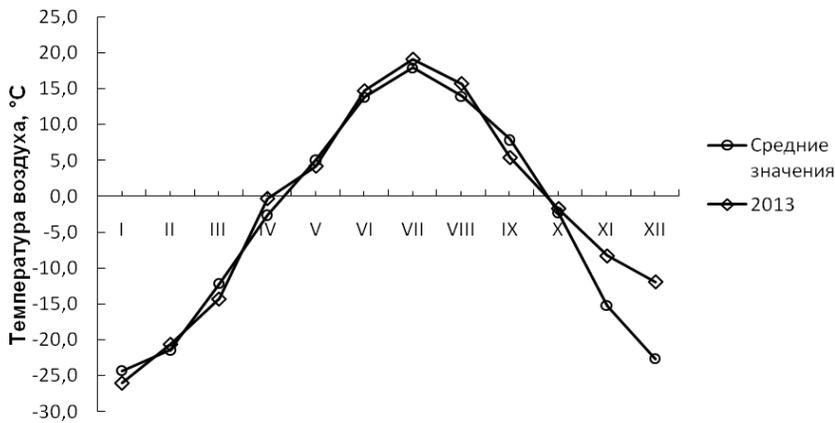
Материалы и методы

Исследования проводили на юге Туруханского района Красноярского края, на территории, входящей в зону охвата станции вы-

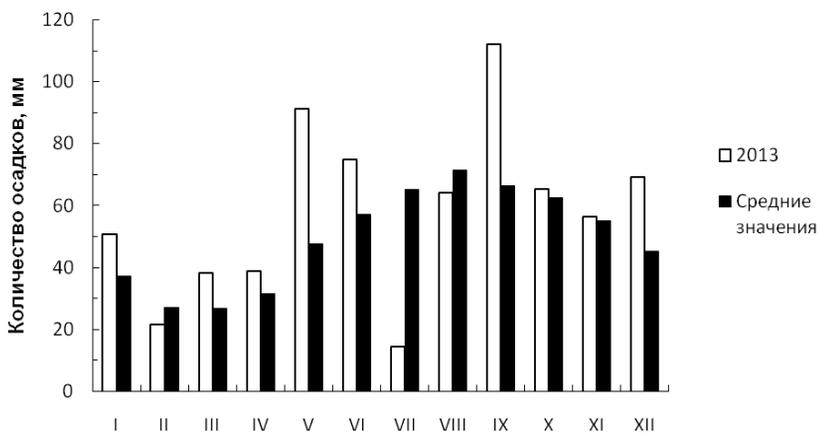
сотной мачты ZOTTO (60° с.ш., 90° в.д.). Район исследования находится в пределах Кеть-Сымской низменности. Основным фактором распределения растительных сообществ в данном районе является уровень грунтовых вод, определяющий степень увлажнения местообитания и дифференциацию увлажнения по элементам рельефа. Почвенный покров представлен иллювиально-железистыми песчаными подзолами, которые характеризуются маломощной подстилкой (горизонт O или A₀, 1–4 см) (Климченко и др., 2011; Lloyd et al., 2002). Особенности песчаных подзолов – низкая влагоемкость и быстрое иссушение почв в летний период.

Климат отличается континентальностью. Согласно агроклиматическому районированию это умеренно холодный район с достаточным увлажнением: сумма температур выше 10 °С составляет 800–1200 °С, гидротермический коэффициент – 1.2–1.6. Среднегодовая температура воздуха минус 3.7 °С. Средняя минимальная температура воздуха минус 48 °С, средняя максимальная температура 31 °С. Абсолютная минимальная температура воздуха минус 54 °С, абсолютная максимальная температура 36 °С. Амплитуда колебания среднемесячных температур 41.9 °С. Среднегодовая относительная влажность воздуха 76 %. Сумма атмосферных осадков 590 мм за год (Лесные экосистемы, 2002).

Температура воздуха за 2013 г. в целом характеризуется значениями, близкими к средним показателям за весь период инструментальных наблюдений (с 1936 г., метеостанция «Бор», единый портал meteo.ru) (рис. 1а). Хотя в зимний период отмечено повышение температуры воздуха, в ноябре и декабре 2013 г. средние показатели были превышены почти в 2 раза. По количеству осадков 2013 г. резко отличается от средних показателей за весь период инструментальных наблюдений



а



б

Рис. 1. Среднемесячные значения температуры воздуха (а) и суммарное количество осадков за месяц (б) в 2013 г. и их среднемноголетние значения за весь период инструментальных измерений на м/с «Бор» (температура воздуха – 1936–2015 гг., количество осадков – 1966–2015 гг.)

(с 1966 г.) (рис. 1б). Можно увидеть, что с апреля отмечается резкий скачок количества осадков, который достигает величины 91.1 мм, что почти в 2 раза превышает средние показатели для предыдущих лет. За таким резким скачком следует не менее резкий спад количества осадков, и в июле оно уже составляет 14.6 мм, что в 4.5 раза ниже средних расчетных значений. Затем количество осадков вновь резко возрастает до 112.1 мм в сентябре 2013 г. и лишь к октябрю приближается к средним показателям. Подобные скачкообразные флуктуации выделяют данный фактор из ряда других метеорологических показателей и делают его влияние лимитирующим для раз-

вития ряда процессов в лесной экосистеме, в том числе и динамики потоков CO₂ с поверхности почвы.

В качестве объектов исследования были выбраны участки, представляющие различные типы леса: сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный и смешанный лес. В видовом составе древостоя преобладает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), а на участке со смешанным лесом встречались также отдельные экземпляры берез (*Betula pendula* Roth) и осин (*Populus tremula* L.). Напочвенный покров на участках с лишайниковым типом леса представлен лишайниками – *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar et Vezda, *Cl. arbuscula*

(Wallr) Flot. В сосняке зеленомошном основными представителями напочвенного покрова были мхи – *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum polysetum* Michx. На участке со смешанным лесом напочвенный покров был также из мхов *P. schreberi* и *D. polysetum*. Доминантами травяно-кустарничкового яруса являются: брусника (*Vaccinium vitis-idaea* (L.) Avror.), шикша (*Empetrum nigrum* L.), толокнянка (*Arctostaphylos uva-ursi* L.), плаун пластинчатый (*Lycopodium complanatum* L.) и др. (Трефилова и др., 2009).

В основных древостоях на песчаных подзолах сосредоточено 72.5–108.7 т С га⁻¹. Углерод фитомассы, мортмассы и гумуса почвы в 40-летнем сосняке соотносится как 46-12-42 %, в средневозрастных сосняках – 74-16-10 % (80 лет) и 67-12-21 % (100 лет). Для подзолов характерна сильная кислотность всего профиля, максимальная в подстилке и посте-

пенно уменьшающаяся с глубиной; рН(KCl) верхних горизонтов не превышает 3.0–3.5, а рН(H₂O) 4.0–4.5 (Лесные экосистемы, 2002).

Измерения почвенного дыхания проводили в течение вегетационного сезона с июня до октября 2013 г. на пяти пробных площадках, соответствующих разным типам подстилающей поверхности: сосняк лишайниковый – pp_DLF (data logger forest) и pp1_pinlic, сосняк зеленомошный – pp3_pinmoss, смешанный лес – pp2_mix и участок, представленный песчаной почвой без напочвенного покрова, поврежденный при проведении строительных работ, – pp_sand (рис. 2).

На каждой пробной площади были установлены пластиковые кольца диаметром 20 см, всего 20 колец: 8 колец в сосняке лишайниковом (5 – на участке pp1_pinlic, 3 – на участке pp_DLF), 5 – в сосняке зеленомошном, 5 – в смешанном лесу и 2 кольца на участке

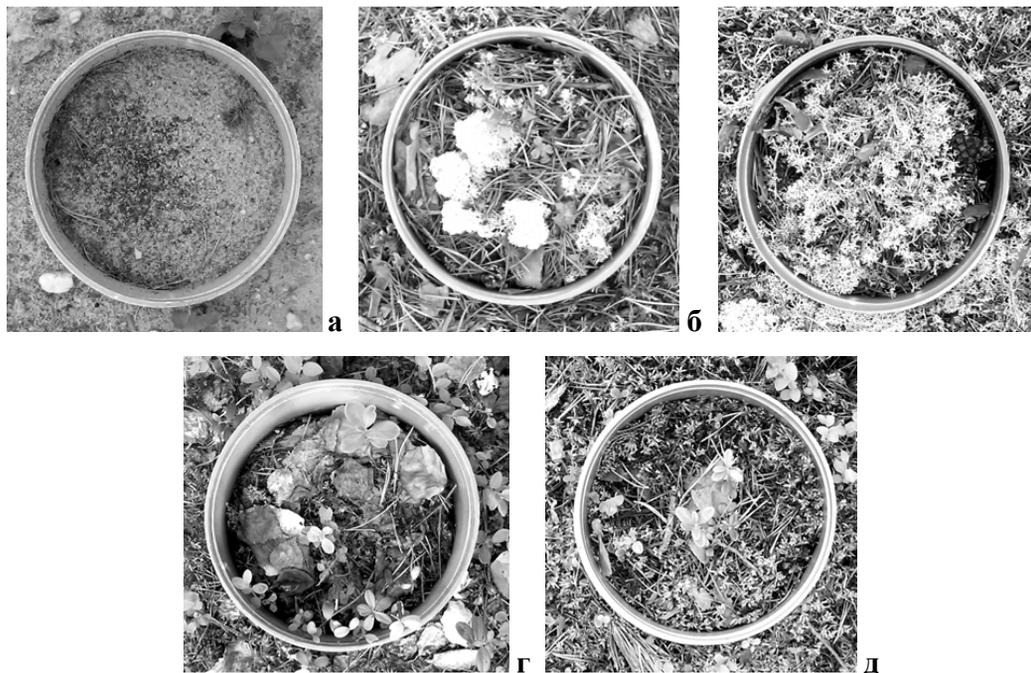


Рис. 2. Измерительные кольца для участков с разными типами напочвенного покрова: а – pp_sand – открытая песчаная почва; б – pp_DLF – сосняк лишайниковый (Data logger forest); в – pp1_pinlic – сосняк лишайниковый; г – pp2_mix – смешанный лес; д – pp3_pinmoss – сосняк зеленомошный

без напочвенного покрова. Глубина проникновения кольца в минеральный слой зависела от типа подстилающей поверхности – она составляла не менее 10 см для всех участков, кроме сосняка зеленомошного – там глубина равнялась 20 см, что было обусловлено высотой мохового яруса и мощностью органического горизонта. При недостаточной глубине установки кольца происходит забор потоков CO₂ из органического горизонта, что нарушает достоверность расчетов.

Расстояние между кольцами определялось однородностью или разнородностью площадки: наличие микрорельефа, плотность древостоя, количественное распределение напочвенного покрова. Расстояние между кольцами не превышало 2 м, что позволило более достоверно оценить пространственную вариацию потока CO₂ с поверхности почвы. Параметр «offset» («выступ») характеризует расстояние от верхнего края кольца до поверхности почвы и является необходимым показателем для расчета суммарного рабочего объема, который, в свою очередь, используется для вычисления потока CO₂ с поверхности почвы.

Измерения величины потока почвенного дыхания проводили с помощью автоматизированной системы по измерению потоков CO₂ с поверхности почвы на основе инфракрасного газового анализатора LI-8100A (LI-COR Biogeosciences Inc., США) (рис. 3).

Основной принцип работы установки LI-8100A – **использование скорости увеличения концентрации CO₂** в измерительной камере для оценки частоты циркуляции CO₂ в свободном воздухе. Для такой оценки условия (градиенты концентраций, атмосферное давление, температура и влажность почвы) должны быть одинаковыми внутри и снаружи камеры. Это достигается путем автоматической корректировки полученных данных и временем измерений, которое не должно превышать 1–3 мин, чтобы минимизировать изменения концентрации CO₂ (LI-COR, 2010).

Измерения почвенного дыхания проводили один раз в сутки с 11:00 до 16:00 с периодичностью для каждого участка один раз в три дня. Высокая частота измерений позволила нам оценить влияние данного условия на достоверность значений величины сезонного потока. В случаях, когда влажность воздуха



Рис. 3. Инфракрасный газоанализатор LI-COR (LI-8100)

превышала 90 %, измерения не проводили ввиду большой погрешности в получаемых данных. Измерения осуществляли в трех повторностях, время измерения – 2 мин с промежутком между измерениями 30 с.

Ежемесячно проводили измерения суточной динамики почвенного дыхания. Прибор устанавливали на измерительное кольцо, характеризующееся средними значениями почвенного дыхания для исследуемого типа подстилающей поверхности, интервал между измерениями составлял 30 мин. Наши эксперименты характеризуют изменение потоков CO₂ с поверхности почвы на протяжении 24 ч в разные промежутки вегетационного сезона.

Измерения температуры почвы осуществляли на трех глубинах – 5, 10 и 15 см с помощью Soil Temperature Probe Type E (Omega, США) с частотой раз в трое суток. На участке без напочвенного покрова, поврежденном вследствие антропогенного воздействия, температуру почвы измеряли только на одной глубине – 5 см, поскольку наличие в грунте камней не позволяло проводить измерения на большей глубине. Объемную влажность почвы измеряли для каждого установленного измерительного кольца с помощью сенсора – Theta Probe Model ML2 (Delta T Devices Ltd., Великобритания). При измерениях на участках с живым напочвенным покровом сенсор устанавливали непосредственно на открытый участок почвы, глубина измерений 5 см. Измерения влажности шли с периодичностью раз в три дня для каждого участка. Исследование климатических характеристик почв на малых глубинах обусловлено тем, что именно в поверхностном слое почвы (до 30 см) сконцентрировано большое количество тонких корней и отмечена высокая активность почвенной микробиоты (Saiz et al., 2006).

Для анализа и обработки полученных результатов использовали специализированный

пакет программ – LI8100_win-4.0.0 Original Software. Кроме того, для всех полученных значений был проведен статистический анализ данных (Statistica, Microsoft Excel), который позволил выявить взаимосвязи, зависимости и соотношения как между отдельными компонентами самого процесса почвенного дыхания, так и с факторами внешней среды (температура, влажность).

Результаты и обсуждение

Динамика температуры и влажности почвы

Непосредственное влияние на формирование почвенного дыхания оказывают температура и влажность почвы (Oberbauer et al., 2007; Saiz et al., 2006; Niinistö et al., 2011). Большинство исследований зависимости дыхания почвы от температуры и влажности в полевых условиях сводится к поиску достоверных корреляций между этими переменными (Макаров, 1988; Ларионова и др., 1993). За вегетационный сезон 2013 г. температура почв изменялась в пределах от 2.1 до 33.3 °С. Минимальные температуры приходились на начало июня, а максимальные – на вторую половину июля. В районе исследований температура почвы на глубине 5 см в течение вегетационного сезона на лесопокрываемых участках варьировала в пределах от 5.2 до 21.1 °С, а на участке без напочвенного покрова от 5.5 до 33.3 °С (рис. 4а). На глубине 10 см значения температуры почв на лесопокрываемых участках находились в пределах от 2.1 до 18.2 °С (рис. 4б). На глубине 15 см наблюдались минимальные флуктуации температур между различными типами участков и температура почв изменялась от 3.1 до 16.6 °С (рис. 4в). Градиент изменения температуры при увеличении глубины с 5 до 10 см составил в среднем для всех участков 1.2 °С, при измерении температуры почвы на

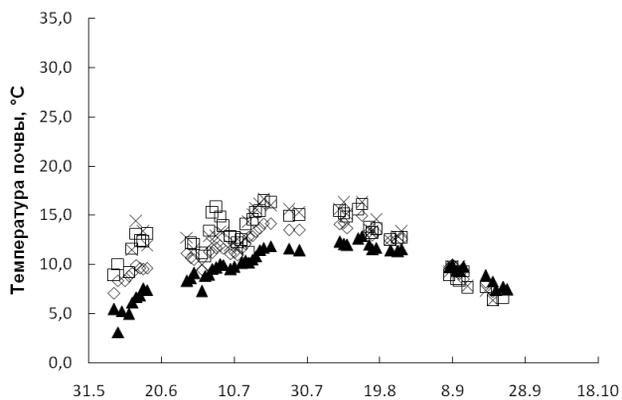
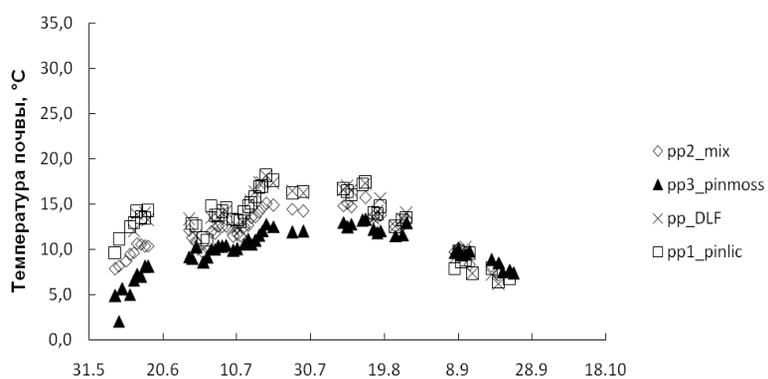
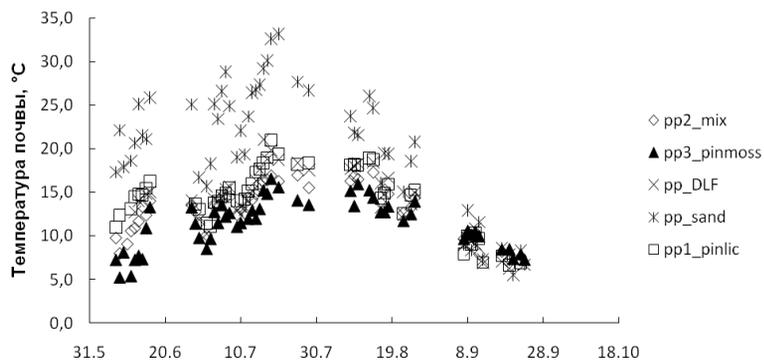


Рис. 4. Динамика температуры почв в течение вегетационного сезона для участков с разными типами напочвенного покрова: а – на глубине 5 см; б – на глубине 10 см; в – на глубине 15 см

15 см температура в среднем снижалась еще на 0.6 °C.

Наибольшие значения температуры почвы отмечены на нарушенном участке без напочвенного покрова (pp_sand). На данном участке наблюдались максимальные амплитуды температур почвы, которые в июле достигли 14.2 °C за 10 дней (с 9 июля по 20 июля). На лесопокрытых участках температура почвы варьировала в достаточно узких пределах. Можно выделить, что наибольшие температуры почв характерны для сосняка лишайникового (pp1_pinlic, pp_DLF) – от 6.2 до 21.1 °C, за ним следует смешанный лес (pp2_mix) – от 7.0 до 17.3 °C и минимальные значения отмечены в сосняке зеленомошном (pp3_pinmoss) – от 2.0 до 16.6 °C. Исходя из данного распределения, участки с большей мощностью напочвенного покрова характеризуются меньшей температурой почв. Интересен тот факт, что к концу вегетационного сезона (со второй половины августа) различия по температуре почвы между участками с разными типами подстилающей поверхности существенно уменьшаются.

Согласно полученным нами зависимостям эмиссии CO₂ от температуры почвы (на глубине 15 см) динамика последней может объяснить 30–70 % значений эмиссии CO₂ в зависимости от типа подстилающей поверхности. В работе Кургановой (2006) было также показано, что корреляционная связь между скоростью эмиссии CO₂ и температурой верхнего слоя почвы почти всегда положительная и наиболее тесная в подзолистых почвах естественных ценозов северо- и среднетаежной зон ($R=0.54-0.79$, $\alpha=5$ %). Максимальной зависимостью между температурой почвы и величиной потоков CO₂ характеризуется смешанный тип леса. По имеющимся на сегодня оценкам, температура является достаточно надежным показателем для оценки потока

CO₂ с поверхности почвы (Borken et al., 2002; Yuste et al., 2005; Oberbauer et al., 2007). Так, в работе Russell и Voroney (1998) приводится коэффициент корреляции свыше 0.8 между эмиссией CO₂ и температурой почвы на глубине 10 см. При этом полученные функции (Q_{10}) используются для расчетов эмиссий CO₂ при анализе экосистемного обмена (Lloyd et al., 2002).

Существенный вклад в формирование величины эмиссии CO₂ вносит влажность почвы (Buyanovsky et al., 1986; Mariko et al., 1994; Ryan et al., 2005). В периоды с экстремальными условиями (засухи, переувлажнение) количество осадков становится более значимым фактором, чем температура, и носит определяющий характер в формировании потока CO₂ с поверхности почвы (Euskirchen et al., 2003). Ход сезонного изменения влажности почв для всех исследованных типов участков четко прослеживается на представленной диаграмме (рис. 5). Наибольшие величины влажности почв приходились на начало и конец вегетационного сезона (июнь, сентябрь). В середине сезона (июль, август) отмечен спад влажности почвы, что обусловлено ростом температуры (рис. 4). Важно отметить, что при достаточно высокой влажности почв потоки почвенного дыхания, напротив, находились на низком уровне. Исходя из этого, мы можем утверждать, что повышенная влажность (30 % и более) ведет к ингибированию почвенного дыхания. К подобному заключению приходили и в более ранних работах. Так, Б.Н. Макаров (1988) установил, что увеличение скорости выделения CO₂ обнаруживается до влажности 22–25 весовых %, затем выделение CO₂ депрессируется (Макаров, 1988).

Во всех исследованных типах земной поверхности наблюдалось снижение влажности почвы с июня по июль, достигая ми-

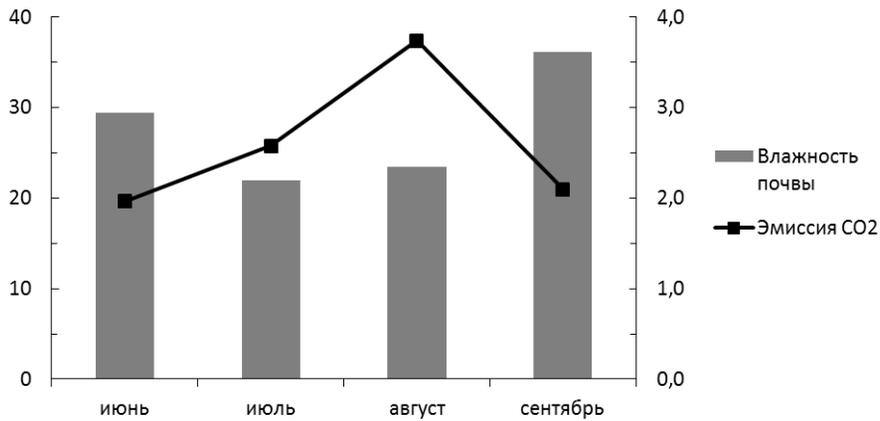


Рис. 5. Влажность почв (%) в разные месяцы вегетационного сезона и величина эмиссии CO₂ с поверхности напочвенного покрова (μмоль CO₂ м⁻²)

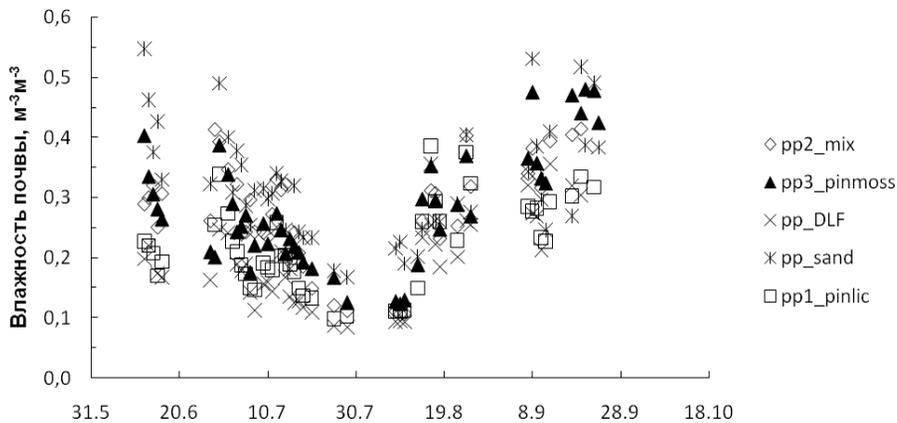


Рис. 6. Динамика влажности почв в течение вегетационного сезона для участков с разными типами напочвенного покрова

нимума в период 25 июля – 15 августа при дефиците осадков в 42 %: сумма осадков (июль-август) = 79 мм, что составляет 58 % относительно многолетнего среднего значения (рис. 1). В сентябре количество осадков на 69 % превысило многолетнее среднее значение.

Минимальные значения влажности почв в течение вегетационного сезона отмечены на участках с лишайниковым напочвенным покровом – pp_DLF и pp1_pinlic от 0.08 до 0.39 м³ м⁻³ (рис. 6). На участке со смешанным ле-

сом (pp2_mix) зафиксированы средние для лесопокрываемых участков величины влажности почв – от 0.11 до 0.41 м³ м⁻³. Сосняк зеленомошный (pp3_pinmoss) характеризуется максимальной влажностью почвы среди участков с напочвенным покровом – от 0.12 до 0.48 м³ м⁻³. На участке без напочвенного покрова (pp_sand) ввиду отсутствия перехвата осадков растительным покровом и транспирационных потерь воды наблюдались максимальные величины влажности почв – от 0.17 до 0.55 м³ м⁻³.

Сезонная величина эмиссии CO₂

Исследование динамики почвенного дыхания, проводившееся с июня по октябрь 2013 г., показало ряд различий в величинах потока CO₂ с поверхности почвы на участках с разными типами подстилающей поверхности: сосняк лишайниковый, сосняк зеленомошный, смешанный тип леса и нарушенный участок без напочвенного покрова. Помимо пространственной неоднородности была выявлена временная изменчивость почвенного дыхания в течение вегетационного сезона.

Величина эмиссии CO₂ за весь вегетационный период с разных типов подстилающей поверхности составила (56.5±1) моль CO₂ м⁻² (рис. 7). Максимальные потоки приходились на середину вегетационного сезона 2013 г. (июль). Именно в этом месяце складываются наиболее благоприятные (в среднем) погодные условия для функционирования микробных сообществ и имеет место активный дыхательный процесс корневых систем высших растений. Наибольший вклад в общую эмиссию CO₂ с поверхности почвы в течение вегетационного сезона внес смешанный тип леса – (18.2±0.3) моль CO₂ м⁻² (pp2_mix). Ми-

нимальные потоки CO₂ за весь сезон были отмечены на участке с открытой песчаной почвой (pp_sand) и составили (1.9 ±0.1) моль CO₂ м⁻². Участки с преобладанием сосны в составе древесного полога характеризовались достаточно сходными величинами почвенного дыхания за вегетационный сезон: сосняк зеленомошный pp3_pinmoss – (12.2±0.2) моль CO₂ м⁻², сосняки лишайниковые pp_DLF и pp1_pinlic – (12.4±0.3) и (11.7±0.2) моль CO₂ м⁻² соответственно. Причем на участке pp1_pinlic, в отличие от других рассмотренных, в июле не происходило стремительного роста величины почвенного дыхания (4.0±0.03 моль CO₂ м⁻²), она была даже несколько ниже, чем в августе (4.4±0.11 моль CO₂ м⁻²). Это обусловлено критически низким уровнем влажности почвы для данного типа подстилающей поверхности, который ингибирует процессы почвенного дыхания.

Степень развития и тип напочвенного покрова оказывают существенное влияние на величину почвенного дыхания (рис. 8). На участке без напочвенного покрова (pp_sand) флуктуации потоков минимальные и варьируют в пределах от 0.11 до 1.24 μмоль CO₂ м⁻² с⁻¹

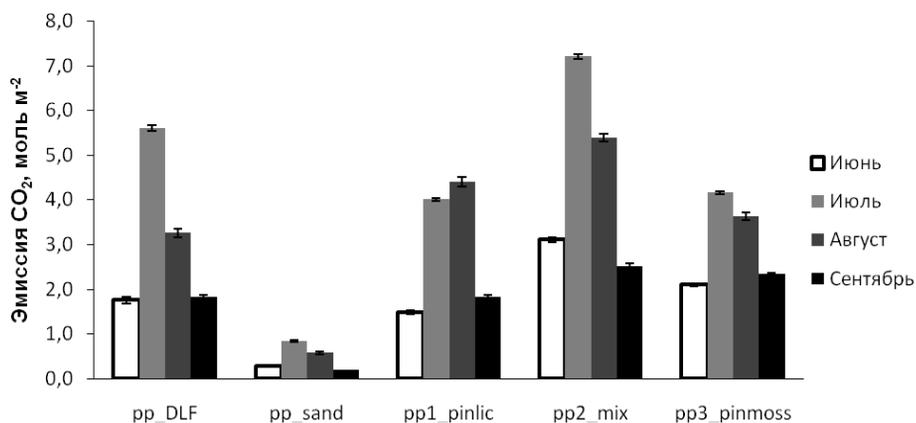


Рис. 7. Величина эмиссии CO₂ с поверхности напочвенного покрова в разные месяцы: pp_sand – участок без напочвенного покрова, pp1_pinlic – сосняк лишайниковый, pp2_mix – смешанный лес, pp3_pinmoss – сосняк зеленомошный, pp_DLF – сосняк лишайниковый (Data logger forest). Планками погрешностей обозначены стандартные отклонения

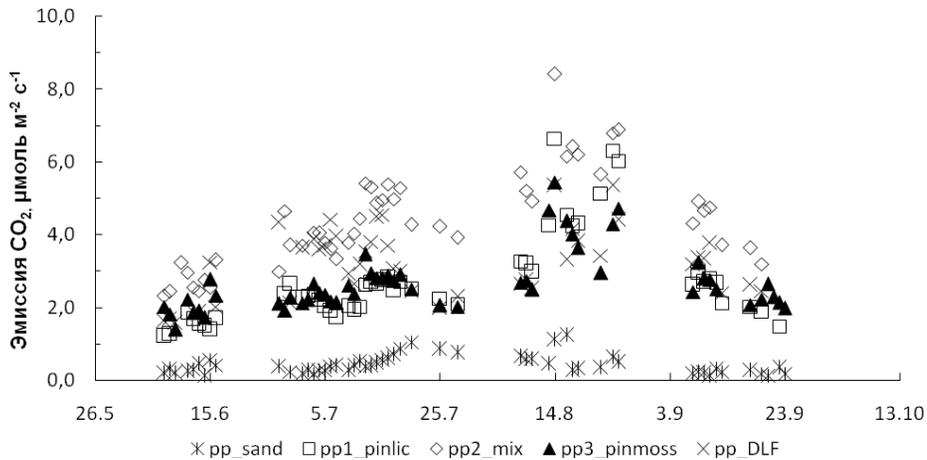


Рис. 8. Сезонная динамика эмиссионного потока CO₂ с поверхности напочвенного покрова: pp_sand – открытая песчаная почва, pp1_pinlic – сосняк лишайниковый, pp2_mix – смешанный лес, pp3_pinmoss – сосняк зеленомошный, pp_DLF – сосняк лишайниковый (Data logger forest)

(в среднем (0.42 ± 0.2) $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$), что в 8 раз ниже, чем на лесопокрытых участках. Среди лесных участков минимальные значения потоков CO₂ с поверхности почвы отмечены на участке с зеленомошным типом леса (pp3_pinmoss), меняются в диапазоне от 1.39 до 5.44 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в среднем (2.67 ± 0.8) $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Максимальные значения потоков на данном участке приходятся на вторую половину августа. Сосняк лишайниковый, доминирующий тип леса в районе исследования, характеризуется средними значениями почвенного дыхания от 1.21 до 6.63 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в среднем (2.71 ± 1.2) $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) на участке pp1_pinlic и от 1.57 до 5.35 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в среднем (3.2 ± 1) $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) на участке pp_DLF. Максимальные потоки CO₂ с поверхности почвы наблюдаются в смешанном лесу pp2_mix. За весь сезон они изменяются от 2.31 до 8.41 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в среднем (4.39 ± 1.3) $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) и пиковые значения зафиксированы во второй половине августа (до 8.41 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Сходные значения потоков CO₂ с поверхности почвы отмечены для сосновых лесов Финляндии, в которых за период с мая по октябрь в среднем

приходится 3.3–7.4 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Полученные нами данные сопоставимы с результатами наших коллег и могут быть использованы для сравнительного анализа двух территорий (Niinisto et al., 2011). Значения эмиссии CO₂ также довольно схожи с результатами исследования лиственных лесов Центральной Эвенкии. Так, для лиственныхников с преобладанием мхов в структуре напочвенного покрова потоки почвенного дыхания составили в среднем от 1.79 до 5.91 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Хотя стоит отметить, что для лиственныхников с лишайниковым напочвенным покровом значения эмиссии CO₂ гораздо ниже полученных нами значений (0.17–0.51 $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$), что свидетельствует о более слабом развитии лишайникового покрова в лесах Эвенкии (Масягина и др., 2005).

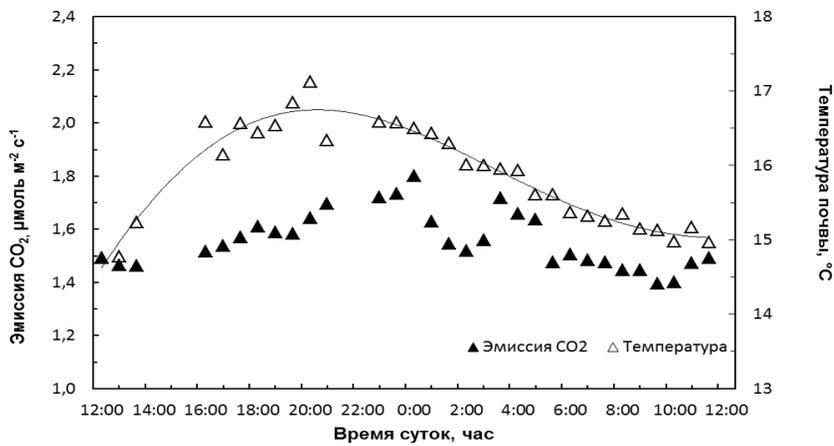
За весь вегетационный период временной промежуток с максимальными (отличающимися от среднего значения) потоками углерода из почвы приходится на вторую половину июля – конец августа 2013 г. Пик активности почвенного дыхания, отмеченный в ранее выполненных работах (Niinisto et al., 2011; Zha et al., 2007; Bhupinderpal-Singh et al., 2003), так-

же приходился на период с середины июля по конец августа, что полностью соответствует результатам, полученным в нашей работе.

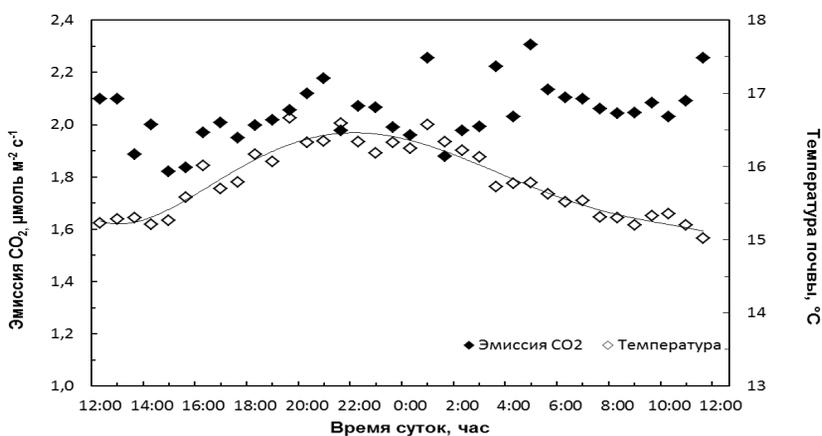
Суточная динамика потоков CO₂

Эмиссия CO₂ с поверхности почвы в течение суток зачастую обусловлена изменением климатических условий и степенью их воздействия в отдельные промежутки времени. Представленная суточная динамика потока CO₂ с поверхности почвы (рис. 9а, б)

отражает ход активности процесса в разные периоды вегетационного сезона. Несмотря на то что варьирование величин потоков в течение суток довольно незначительное, характер их изменения можно четко проследить. Максимальные значения потоков приходятся на вечерние часы с 20:00 до 00:00. Также выделяются два периода с минимальными значениями эмиссии CO₂: в ночные часы с 00:00 до 04:00, в полуденное время с 12:00 до 16:00 (полуденная депрессия), что связано не только с



а



б

Рис. 9. Суточная динамика почвенного дыхания в сосняке лишайниковом (pp_DLF) и суточная динамика температуры почвы на глубине 10 см: а – 26.07.13; б – 11.08.13

понижением температуры, но и с процессами транспорта и оттока ассимилятов в ризосфере, играющими определяющую роль (Ларионова, Розонова, 1993). Также в дневные часы (с 12:00 до 16:00) при повышении температуры почвы можно наблюдать некоторый эффект запаздывания, поскольку значения потоков CO₂ с поверхности почвы продолжают опускаться под действием низких утренних температур еще некоторый период времени. Увеличение эмиссии в вечерние часы, вероятно, обусловлено ростом выделения CO₂ в результате дыхания живого напочвенного покрова (сосудистые растения и лишайники), при затухании их фотосинтетической активности. Ввиду прогрева почвы происходит и увеличение активности почвенной микробиоты, которая является значимой составляющей в формировании потока CO₂ с поверхности почвы. Как отмечалось ранее, были обнаружены тесные положительные связи между среднесуточной интенсивностью выделения CO₂ из почв и температурой почвы ($R^2=0.28-0.65$), причем отклик на повышение температуры зависел от количества тонких корней (Курганова, 2006). Интересно, что рост дыхания в ночные часы происходит с момента восхода Солнца: 26.07.16 – 04:26, 11.08.16 – 05:05 (<http://www.timezone.ru/suncalc.php>).

Взаимозависимость между величиной потока CO₂ с поверхности почвы и температурой почвы меняется в течение суток. Прямая положительная и довольно сильная ($R=0.7$) зависимость наблюдалась во второй половине дня (с 16:00 до 20:00), когда рост температуры сопровождался увеличением количества выделяемого CO₂. При последующем уменьшении температуры в вечерние часы с 20:00 до 00:00 происходит температурная инверсия и потоки CO₂ еще некоторое время продолжают расти. В ночные часы можно отметить различную реакцию на изменение темпера-

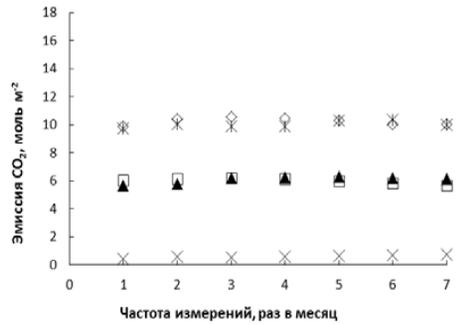
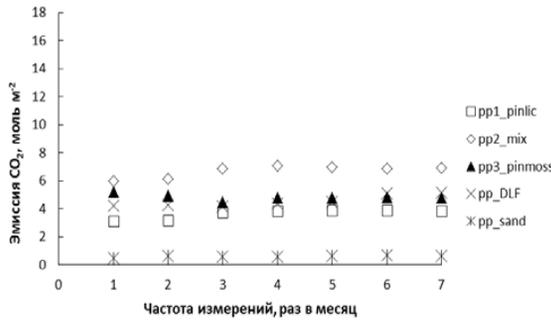
туры почвы для разных дат измерений. Измерение, проведенное 26 июля, показало, что спад температуры в ночные часы не привел к уменьшению потоков почвенного дыхания, а, напротив, – к их росту. При измерении 11 августа с уменьшением температуры после полуночи произошел спад активности процесса почвенного дыхания при некотором росте в момент восхода Солнца.

Роль частоты измерений в достоверности величин эмиссии CO₂

Частота измерений в значительной степени определяет точность полученных оценок сезонной эмиссии CO₂ с поверхности почвы. В частности, в работе Russell et al. (1998) для осиновых лесов Северной Канады (54° с.ш., 106° з.д.) показано, что измерения один и два раза в месяц не достоверно отражают реальные значения потоков CO₂ с поверхности почвы. С подобной низкой частотой измерений также не представляется возможным проследить временную динамику процесса и установить периоды максимальной активности.

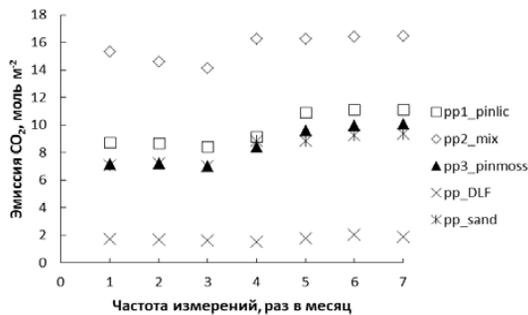
Достаточное количество измерений обуславливает снижение вариабельности между измеренными величинами и установление их на относительно постоянном уровне. В нашей работе мы сравнили, как меняется величина потоков CO₂ с поверхности почвы при увеличении частоты измерений в течение вегетационного сезона (рис. 10). Для каждого месяца был рассчитан коэффициент вариации в качестве критерия оценки вариабельности полученных данных. Сравнительный анализ мы проводили для всех типов рассмотренных участков с разными типами напочвенного покрова.

Установлено, что при измерениях с частотой 5 и более раз в месяц для всех типов участков отмечается выход значений вели-



а

б



в

г

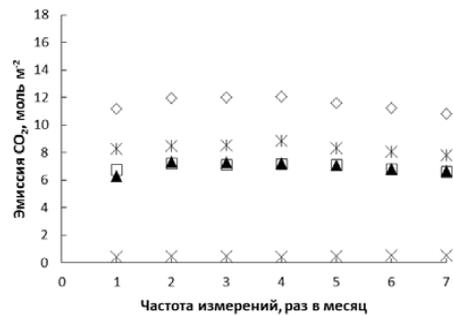


Рис. 10. Изменение величины потока CO_2 при увеличении частоты измерений в разные месяцы: а – июнь; б – июль; в – август; г – сентябрь

чин эмиссии CO_2 на постоянный уровень и следовательно, данное количество измерений может рассматриваться достаточным. Причем значение частоты измерений оказалось наиболее важным в периоды нестационарных состояний, характеризующихся закономерными изменениями внешних условий (температуры и влажности почвы): начало и конец вегетационного сезона. В июне с ростом температур происходит постепенное увеличение потоков CO_2 с поверхности почвы. В конце сезона (сентябрь) наблюдается снижение почвенного дыхания за счет понижения температуры воздуха и роста количества осадков. Достаточное стационарное состояние (высокая температура и низкое количество осадков) в отношении эмиссии CO_2 приходится на июль, когда не фиксируется какого-либо изменения в значениях месяч-

ных потоков эмиссии CO_2 при увеличении количества измерений. В августе происходит резкое увеличение количества осадков и снижение температуры, и в данном случае частота измерений 5 и более раз в месяц позволяет получить более достоверные значения месячных значений потоков CO_2 с поверхности почвы. К подобному заключению приходят в своих исследованиях Ларионова и Розонова (1993): для корректной оценки сезонной эмиссии CO_2 интервал между измерениями должен быть не более 5–7 дней (4–6 раз в месяц). В то же время определение интенсивности почвенного дыхания один раз в 20 дней приводит к почти 2-кратному занижению или завышению значений потоков.

Статистическое обоснование выше-рассмотренных результатов получено при

расчете коэффициента вариации. Причем его значения в большей степени связаны с периодом проведения измерений. В июне, несмотря на рост количества измерений, вариация значений потоков CO₂ остается на высоком уровне (около 20 %), что обусловлено меняющимися климатическими условиями. В остальные месяцы при пяти и более измерениях в месяц коэффициент вариации находится на относительно постоянном уровне и не превышает 10 %, что свидетельствует о высокой достоверности полученных значений.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в пределах сосновых древостоев Средней Сибири существует ряд особенностей развития и функционирования, которые позволяют выявить примененный нами метод закрытых камер динамического типа. Нами были установлены величины эмиссионных потоков CO₂ в основных типах напочвенного покрова района исследований. Максимальные потоки CO₂ зафиксированы в смешанном типе леса с большой мощностью напочвенного покрова. Минимальные потоки отмечены на нарушенном участке с песчаной почвой без напочвенного покрова.

В течение вегетационного периода выявлен характер динамики почвенного дыхания. Рост температур почвы в начале сезона сопровождается ростом величины потоков CO₂ с поверхности почвы. Однако снижение влажности почвы и повышение температуры в середине сезона обуславливают падение величин почвенного дыхания. Как след-

ствие, максимум выделения CO₂ приходится на вторую половину июля – конец августа, когда влажность почвы возрастает в связи с поступлением значительного количества атмосферных осадков и уменьшением эвапотранспирационных потерь воды при снижении температур воздуха.

Суточный ход почвенного дыхания в исследованных участках с различными типами напочвенного покрова характеризуется малой амплитудой колебаний потока CO₂. Причем его максимум приходится на ночные часы. Основным климатическим фактором, воздействующим на динамику почвенного дыхания в течение суток, является температура почвы. Характер ее воздействия меняется в зависимости от времени суток: в послеполуденные часы наблюдается положительная зависимость между потоком CO₂ и температурой почвы, в вечерние часы – отрицательная. В различные периоды вегетационного сезона отмечены небольшие изменения в значениях потоков CO₂ с поверхности почвы.

Важным условием достоверной оценки сезонных величин почвенного дыхания служит частота проводимых измерений. Для исследованных нами среднетаежных лесов Средней Сибири показано, что измерения пять и более раз в месяц существенно уменьшают вариабельность значений и наиболее достоверно описывают сезонную динамику потоков CO₂ с поверхности почвы. Причем частота измерений в значительной степени влияет на величину почвенного дыхания в периоды с меняющимися климатическими условиями.

Список литературы

Климченко А.В., Верховец С.В., Слинкина О.А., Кошурникова Н.Н. (2011) Запасы крупных древесных остатков в среднетаежных экосистемах Приенисейской Сибири. *География и природные ресурсы*, 2: 91–97 [Klimchenko A.V., Verkhovets S.V., Slinkina O.A., Koshurnikova N.N.

(2011) The pool of coarse woody debris in the middle taiga ecosystems in Priyeniseyskay Siberia. *Geography and natural resources* [Geografiya i prirodnye resursy], 2: 91–97 (in Russian)]

Курганова И.Н., Ермолаев А.М., Лопес де Гереню В.О., Ларионова А.А., Сапронов Д.В., Келлер Т., Ланге Ш., Розанова Л.Н., Личко В.И., Мякшина Т.Н., Кузяков Я.В., Романенков В.А. (2006) Потоки и пулы углерода в залежных землях Подмосковья. *Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв*. Кудеяров В.Н. (ред.) М., Наука, с. 271–284 [Kurganova I.N., Ermolaev A.M., Lopes de Geranyu V.O., Larionava A.A., Saprionov D.V., Keller T., Lange S., Rosanova L.N., Lichko V.I., Myakshina T.N., Kuzyakov Y.V., Romanenkov V.A. (2006) Fluxes and pools of carbon of the former arable lands in Moscow region. *Soil processes and spatial-temporal soil organization*. Kudeyarov V.N. (ed.) Moscow, Nauka, p. 271–284 (in Russian)]

Ларионова А.А., Розонова Л.Н. (1993) Суточная, сезонная и годовая динамика выделения CO₂ из почвы. *Дыхание почвы*. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. (ред.) Пушкино, Пушкинский научный центр, с. 59–75 [Larionova A.A., Rosonova L.N. (1993) Diurnal, seasonal and annual dynamics CO₂ emission from the soil. *Soil respiration*. Zavarzin G.A., Kudeyarov V.N. (eds.) Pushino, Pushino science center, p. 59–75 (in Russian)]

Лесные экосистемы Енисейского меридиана (исследования по международной геосферно-биосферной программе) (2002) Плешиков Ф.И. (ред.) Новосибирск, Наука СО РАН, 356 с. [*Forest ecosystems of the Yenisey meridian* (2002) Pleshikov F.I. (ed.) Novosibirsk, Nauka SB RAS, 356 p. (in Russian)]

Макаров Б.Н. (1988) *Газовый режим почвы*. М., Агропромиздат, 105 с. [Makarov B.N. (1988) *Gas regime of the soil*. М., Агропромиздат, 105 p. (in Russian)]

Масягина О.В., Прокушкин С.Г., Абаимов А.П., Мори Ш., Койке Т. (2005) Эмиссия CO₂ с поверхности напочвенного покрова в лиственничниках Центральной Эвенкии. *Лесоведение*, 6: 19–29 [Masyagina O.V., Prokushkin S.G., Abaimov A.P., Mori S., Koike T. CO₂ emission from the ground cover in larch stands in the Central Evenkia. *Forestry studies* [Lesovedenie], 4: 19–29 (in Russian)]

Трефилова О.В., Ведрова Э.Ф., Оскорбин П.А. (2009) Запас и структура крупных древесных остатков в сосняках Енисейской равнины. *Лесоведение*, 4: 16–23 [Trefilova O.V., Vedrova E.F., Oskorbin P.A. (2009) The stock and structure of large woody debris in the pine forests of the Yenisei plain. *Forestry studies* [Lesovedenie], 4: 16–23 (in Russian)]

Bekku Y., Koizumi H., Oikawa T., Iwaki H. (1997) Examination of four methods for measuring soil respiration. *Soil Ecology*, 5: 247–254

Bhupinderpal-Singh, Norgren A., Ottosson Lefvenius M., Hegberg M.N., Mellander P.-E., Hegberg E.P. (2003) Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year. *Plant, Cell and Environment*, 26: 1287–1296

Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. (2004) A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biol.*, 10: 1756–1766

Borken W., Xu Y.J., Davidson E.A., Beese F. (2002) Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 8: 1205–1216

Bouwman A., Germon J. (1998) Special issue: soils and climate change: introduction. *Biology and Fertility of Soils*, 27: 219–219

- Buyanovsky G.A., Wagner G.H., Gantzer C.J. (1986) Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 338–344
- Doran J.W., Parkin T.B. (1994) Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Spec. Publ. 35*. Doran J.W. et al. (eds.) SSSA, Madison, WI, p. 3–22
- Euskirchen E.S., Chen J., Gustafson E.J., Ma S. (2003) Soil respiration at dominant patch types within a managed Northern Wisconsin landscape. *Ecosystems*, 6: 595–607
- Joo S.J., Park S.U., Park M.S., Lee C.S. (2012) Estimation of soil respiration using automated chamber systems in an oak (*Quercus mongolica*) forest at the Nam-San site in Seoul, Korea. *Sci. Total Environ.*, 416: 400–409
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O. (2008) Assessment of changes in soil organic carbon storage in soils of Russia, 1990–2020. *Eurasian Soil Sci.*, 41 (13): 1371–1377
- Lal R. (2005) Forest soils and carbon sequestration. *Ecological Management*, 220: 242–258
- LI-8100A Automated Soil CO₂ Flux System & LI-8150 Multiplexer Instruction Manual* (2010) Nebraska, USA, LI-COR Biogeosciences Inc., 404 p.
- Lloyd J., Shibistova O., Zolotoukhine D., Kolle O., Arneth A., Wirth C., Styles J.M., Tchebakova N.M., Schulze E.-D. (2002) Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest. *Tellus*, 54B: 590–610
- Mariko S., Bekku Y., Koizumi H. (1994) Efflux of carbon dioxide from snow-covered forest floors. *Ecol. Res.*, 9: 343–350
- Niinistö S.M., Kellomäki S., Silvola J. (2011) Seasonality in a boreal forest ecosystem affects the use of soil temperature and moisture as predictors of soil CO₂ efflux. *Biogeosciences*, 8: 3169–3186
- Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V. (2000) *Full carbon account for Russia. Interim report*. IIASA, 181 p.
- Oberbauer S.F., Tweedie C.E., Welker J.M., Fahnestock J.T., Henry G.H.R., Webber P.J., Hollister R.D., Walker M.D., Kuchy A., Elmore E., Starr G. (2007) Tundra CO₂ fluxes in response to experimental warming across latitudinal and moisture gradients. *Ecol. Monogr.*, 77: 221–238
- Powers J.S., Schlesinger W.H. (2002) Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica. *Geoderma*, 109: 165–190
- Russell A., Voroney R.P. (1998) Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. *Can. J. Soil Sci.*, 78: 301–310
- Ryan M.G., Law B.E. (2005) Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73: 3–27
- Saiz G., Green C., Butterbach-Bahl K., Kiese R., Avitabile V., Farrell E.P. (2006) Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands. *Plant Soil*, 287: 161–176
- Tang J., Misson L., Gershenson A., Cheng W., Goldstein A.H. (2005) Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132 (3–4): 212–227

Yuste J.C., Nagy M., Janssens I.A., Carrara A., Ceulemans R. (2005) Soil respiration in a mixed temperate forest and its contribution to total ecosystem respiration. *Tree Physiol*, 25: 609–619

Zha T., Xing Z., Wang K.-Y., Kellomaeki S., Barr A.G. (2007) Total and component carbon fluxes of a Scots Pine ecosystem from chamber measurements and eddy covariance. *Annals of Botany*, 99: 345–353