

УДК 631.4

ГАЗООБМЕН ДИОКСИДА УГЛЕРОДА С ПОВЕРХНОСТИ СФАГНУМА В ЗАБОЛОЧЕННОМ СОСНЯКЕ ЮЖНОЙ ТАЙГИ

Молчанов А.Г.

Институт лесоведения РАН, с. Успенское

a.georgievich@gmail.com

Изучали зависимость газообмена диоксида углерода с поверхности естественно произрастающего сфагнома от солнечной радиации и температуры воздуха при разных уровнях почвенно-грунтовых вод (УПГВ). Исследования проводились в заболоченном сосняке южной тайги в Ярославской области. Установлено, что характер зависимости NEE мохового покрова и дыхания почвы от метеорологических факторов меняется при разных УПГВ. Снижение УПГВ на глубину менее 20 см меняет поглощение диоксида углерода моховым покровом на его эмиссию и приводит к значительному снижению влияния, как солнечной радиации, так и температуры воздуха.

Ключевые слова: газообмен, диоксид углерода, NEE мохового покрова, сфагнум, дыхание почвы, уровень почвенно-грунтовых вод, температура воздуха, солнечная радиация, южная тайга

Цитирование: Молчанов А.Г. 2017. Газообмен диоксида углерода с поверхности сфагнома в заболоченном сосняке южной тайги // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 8. № 1. С. 43-54.

Citation: Molchanov A.G. 2017. Gas exchange of carbon dioxide from the surface of *Sphagnum* in boggy pine forests in southern taiga // Environmental dynamics and global climate change. V. 8. No. 1. P. 43-54.

ВВЕДЕНИЕ

Торфяные болота занимают значительную часть суши Земного шара. Запас углерода в их торфах составляет примерно одну треть от мировых запасов органического углерода почвы [Loisel et al., 2012]. В нашей стране торфяные болота занимают более 8% территории России, а с учетом мелкоотторфованных земель, более 20%. Значительная часть болот в таежной зоне представлена верховыми болотами, где доминируют кустарничково-сфагновые биогеоценозы [Вомперский с соавт., 2005; 2011]. Торфяные сфагновые болота представляют важную буферную систему для поддержания устойчивости биосферы [Заварзин и Дедыш, 2008]. Газообмен диоксида углерода между болотными почвами и атмосферой может существенно сказываться на содержании этого парникового газа в атмосфере. Обмен диоксида углерода может значительно изменяться в течение сезона, как по направленности, так и по интенсивности. Как показывают исследования, выделение диоксида углерода с поверхности верхового болота в одних случаях больше зависит от температуры, в других – от влажности почвы [Курбатова с соавт., 2004; Курбатова с соавт., 2014; Наумов с соавт., 1999]. В условиях происходящих изменений климата, сопутствующее изменение осадков может иметь решающее значение для увеличения площади бореальных болот [Schipperges and Rydin, 1998]. Без наблюдений, прежде всего за уровнями почвенно-грунтовых вод на естественных и различно осушенных болотах, нельзя надежно утверждать, способствует ли в конкретном регионе изменение современного климата процессам разболачивания, или усиления болотообразования [Вомперский, 2009]. Уровень почвенно-грунтовых болотных вод (УПГВ) оказывает заметное влияние на величину потока диоксида углерода. Закономерное понижение УПГВ к концу сезона приводит к сдвигу максимальных значений продуцирования диоксида углерода на конец августа – начало сентября [Наумов, 2009].

Как показали исследования, проведенные в нашей стране методом микровихревых пульсаций (Eddy covariance), ведущую роль в определении газообмена диоксида углерода играют гидрометеорологические условия [Kurbatova et al., 2009], которые подвержены значительным колебаниям. Например, в северной части Западной Сибири колебание УПГВ в болотах составляет 0.2-0.5 м [Zakharova et al., 2014].

Большое влияние УПГВ оказывает на величину потока диоксида углерода. Наибольшее выделение диоксида углерода наблюдается в августе-сентябре, когда происходит снижение УПГВ. Закономерное понижение температуры и влажности почвы к концу сезона приводит к снижению

интенсивности газообмена [Наумов, 2009]. Возможно в ситуации изменения климата, решающее значение для роста бореальных болот будет иметь количество осадков [Loisel et al., 2012].

Все сказанное выше свидетельствует о большой изменчивости процессов газообмена диоксида углерода на болотах и его зависимости от места и времени. В связи с этим для более точной оценки роли болот в газообмене и содержании диоксида углерода в атмосфере необходимо располагать как можно большим числом данных, полученных в разных пунктах ареала при разных внешних условиях.

В предыдущей статье [Молчанов, 2015] нами было рассмотрена зависимость газообмена диоксида углерода сфагнома (без торфа, на котором он произрастает) от окружающих факторов при различных УПГВ.

Целью настоящей работы было: определить зависимость газообмена диоксида углерода с поверхности сфагнома в заболоченном сосняке вместе с нижележащим торфом (NEE мохового покрова), и отдельно дыхания почвы от температуры и влажности воздуха при разных УПГВ и сравнить значимость этих факторов для газообмена.

Принятые сокращения

УПГВ – Уровень почвенно-грунтовых болотных вод.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в Угличском р-не Ярославской обл. на стационаре “Городище” (57°42′ с.ш., 38°34′ в.д.) северной Лесной опытной станции Института лесоведения РАН, в заболоченном пушицево-сфагновом сосняке (подзона южной тайги). Сверху торф был покрыт слоем сфагнома. Граница между слоем сфагнома и торфа находилась примерно на глубине 7 см. За нулевую отметку условно принимали поверхность головок сфагнома. Микрорельеф мелко-западинный. Мощность торфяной залежи около 1 м. Пушицево-сфагновый сосняк Vб бонитета представлен двумя поколениями сосны 54 и 144 лет, корневые шейки старых сосен до глубины 40-60 см погружены в торф, сомкнутость насаждения составляет 0.3. В насаждении имелся травяно-кустарничковый ярус высотой 49-60 см, с проективным покрытием 70-75%. Моховой покров сплошной, с доминированием *Sphagnum fuscum*, при участии *Sph. medium* и *Sph. rubellum* [Арутюнян и Уткин, 1986].

Измерение потока диоксида углерода с поверхности сфагнома и почвы проводили в течение 2009 и 2011 гг. по открытой схеме по методу, описанному Эдвардсом и Золлинсом [Edwards and Sollins, 1973]. Для этого на подушку сфагнома, которая состояла только из сфагнома без других растений, устанавливали прозрачную камеру диаметром 20 см и высотой 10 см, через которую над поверхностью мха в камере поддерживали постоянный проток атмосферного воздуха 60-100 л ч⁻¹. Такая же камера была установлена рядом, но с удаленной зеленой частью сфагнома (“очес”), эмиссию с которой приняли как дыхание почвы. Для входа воздуха в камеру были сделаны шесть отверстий диаметром 5 мм и одно для отбора воздуха. Проведенные ранее исследования показали, что для используемой камеры такая площадь отверстий приводит к минимальным ошибкам измерений, ввиду минимального подсоса воздуха из почвы [Татаринов с соавт., 2009].

Измерение концентрации диоксида углерода в воздухе проводили инфракрасным газоанализатором “Кедр” (Россия), работающим по дифференциальной схеме и газоанализатором “LI-820” (Li-Cor, США), работающим по абсолютной схеме. Показания газоанализаторов учитывались каждые 5 сек и регистрировались логгером (EMS, Чехия) как среднее за каждые 20 секунд. Полученные показания запоминались логгером, а затем данные за 3-5 дней переписывать в ноутбук. Одновременно с определением газообмена регистрировали приходящую к поверхности сфагнома солнечную радиацию, температуру почвы и воздуха и влажность воздуха. Датчик солнечной радиации (термоэлектрический пиранометр Янишевского) был установлен на высоте 5см от поверхности сфагнома, датчик температуры почвы на глубине 5 см от поверхности сфагнома, а датчик температуры и влажности воздуха (датчики температуры воздуха и почвы и влажности воздуха использовались, входящие в комплект EMS) на высоте 1.5 м от поверхности сфагнома. Регистрация показаний газообмена диоксида углерода проводилась круглосуточно с помощью оригинального автоматического устройства для записи данных по газообмену растений. Устройство позволяет осуществлять проведение эксперимента одновременно на пяти объектах, автор устройства Н.Г. Жиренко. В этой работе мы использовали данные только двух объектов. При работе “LI-820”, в газоанализатор поступал сначала воздух, прошедший через экспериментальную камеру, а затем

воздух, поступающий в камеру. Чтобы получить достоверные данные мы записывали данные поступающего воздуха в экспозиционную камеру в течение 3-4 мин, а затем в течение следующих 3-4 минут воздуха, выходящего из камеры. Далее из полученных данных рассчитывался газообмен объекта по разности концентрации CO_2 средних величин входящего и выходящего из камеры воздуха, в результате показания газообмена одного объекта получали за 6-7 мин. Время опроса всех камер регулируется от 30 до 40 мин., т.е. за это время было записано одно показание какого-нибудь объекта. При использовании газоанализатора “Кедр”, имеющего две кюветы, в него поступал воздух одновременно из двух воздухопроводов (входящего и выходящего из камеры) в каждую из кювет, в одну воздух до камер, в другую после камер. Прибор в этом случае показывает сразу разность в концентрации диоксида углерода в воздухе до и после камер. Так как «Кедр» имеет значительно большую кювету, то для одного показания мы протягивали воздух через камеру в течение 6 мин. В результате рассчитывали среднюю величину газообмена. Градуировку этого газоанализатора проводили, пропуская воздух с известной концентрацией диоксида углерода в воздухе [Молчанов, 2007], а также сравнением обоих газоанализаторов. Принципиальная схема установки непрерывного определения газообмена опубликована нами ранее [Молчанов, 2005; 2007; 2010; 2014]. Газообмен диоксида углерода с напочвенного покрова сфагнома или с почвы рассчитывали по формуле:

$$G_{\text{sph}} = ((C_b - C_{\text{control}}) \cdot F/S) \cdot a \quad (1)$$

где G_{sph} – газообмен диоксида углерода ($\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$), C_b и C_{control} – средняя за 3 мин концентрация CO_2 в камере и окружающем воздухе (ppm CO_2), F – поток воздуха через камеру (л ч^{-1}), S – площадь поверхности экспозиционной камеры в которой был заключен сфагнум или “очес” (почва) (м^2), a – пересчетный коэффициент. Таким образом, мы получали чистый газообмен диоксида углерода между экосистемой сфагнового яруса и атмосферой (NEE мохового покрова), а также дыхание почвы (R_s).

В течение 2009 и 2011 гг. было проведено несколько циклов чистого газообмена диоксида углерода между экосистемой сфагнового яруса и атмосферой (NEE мохового покрова) и с участка, где удалена зеленая часть сфагнома “очес” (дыхания почвы). Измерения проводились несколько раз за вегетационный период по 3-5 дней за каждый цикл. При этом УПГВ изменялся следующим образом: в мае 2009 г. он равнялся – 4 см, в июне 2009 г. – 7 см, в июле 2009 г. – 33 см, в августе 2009 г. – 21 см и в августе 2011 г. – 43 см. Исследования проводились в течение всех периодов на одной и той же площадке. Как указывалось выше, за нулевую отметку условно принимали поверхность головок сфагнома.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суточные изменения газообмена диоксида углерода с поверхности зеленого сфагнома (NEE мохового покрова) и дыхания почвы при УПГВ на глубине 7 см, представлены на рис. 1. В дневные часы NEE мохового покрова было отрицательным, 0-4 $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, т.е. наблюдалось поглощение диоксида углерода поверхностью мохового покрова. С наступлением вечера, NEE мохового покрова стал положительным, в ночное время, со снижением температуры воздуха, происходит выделение диоксида углерода, интенсивность которого снижалась от 11 до 4 $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На участке, где был снят фотосинтезирующий слой сфагнома (дыхание почвы), наблюдалось выделение диоксида углерода, как в дневные часы, так и ночью (8-12 $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$). В ночные часы, в связи с понижением температуры воздуха, происходило резкое снижение дыхания почвы с 10 до 4 $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. В ночное время в зависимости от температуры дыхание почвы составляло от 4 до 9 $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, тогда как NEE мохового покрова от 7 до 11 $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Таким образом, ночное дыхание сфагнома без почвы (NEE-R_s) составляло 3-4 $\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Колебания NEE мохового покрова были синхронными с суточной динамикой радиации и температуры.

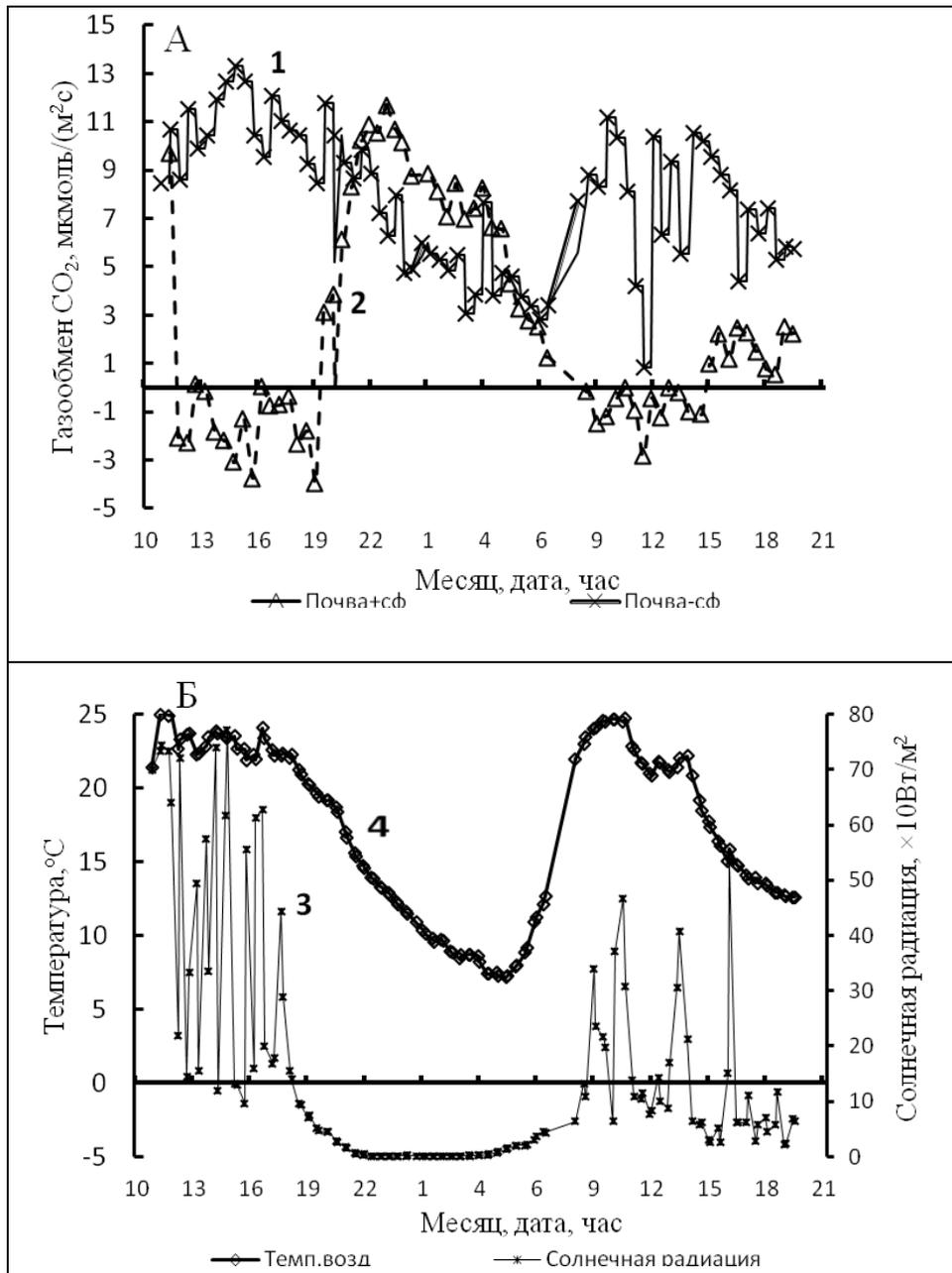


Рис. 1. Суточный ход NEE мохового покрова и дыхания почвы (А) в пушицево-сфагновом сосняке: 1 – NEE мохового покрова (Почва + сф); 2 – дыхание почвы (Почва-сф); и (Б) метеофакторов: 3 – интенсивность солнечной радиации (Радиация); 4 – температура воздуха (Темп. возд).

С опусканием УПГВ до 21 см и в дневные, и в ночные часы NEE мохового покрова был положительным (около 4 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹), наблюдалась эмиссия диоксида углерода, а суточные изменения NEE мохового покрова были не столь резкими. С дальнейшим снижением УПГВ до 33 см и в связи с предшествующими обильными дождями (выпало две месячные нормы осадков) положительные значения NEE мохового покрова значительно увеличились и эмиссия диоксида углерода составили от 8 до 12 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹. При УПГВ, 43 см, значения NEE мохового покрова уменьшились и составляли около 5 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹.

Интенсивность дыхания почвы при УПГВ 4 см, была незначительна и составляла менее 0.5 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹. Когда УПГВ находился на 7 см, интенсивность дыхания почвы значительно увеличилась, до 5 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹. С дальнейшим понижением УПГВ интенсивность дыхания почвы снижалась. При УПГВ, равном 21 и 43 см в сухую погоду, она мало различалась, составляя около 2.5 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹. Однако, при выпадении осадков, в июле в результате увеличения влажности верхнего слоя почвы интенсивность дыхания почвы значительно увеличилась и составила 5.5 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹. Полученные нами данные свидетельствуют о значительном влиянии УПГВ как на интенсивность и направленность, так и на суточный ход NEE мохового покрова.

Полученные значения измеренных величин NEE мохового покрова при уровне грунтовых вод 7 см хорошо согласуются с результатами измерений NEE, полученных с помощью метода EDDY Covariance на олиготрофном сфагнуво-пушицевом болоте "Старосельский мох" (Тверская область). На этом болоте максимальные значения NEE мохового покрова с большим количеством сосудистых растений в летние месяцы в период с 1998 по 2000 гг. в дневное время изменялись в зависимости от температуры и влажности верхних горизонтов почвы от -4 до -7 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹, а в ночное время дыхание экосистемы в среднем составляло 1.2 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹ [Курбатова, 2002]. При этом оказалось, что в сухой 1999 г. наблюдались положительные значения NEE олиготрофного сфагнуво-пушицевого болота, а во влажный 1998 г. наблюдалось поглощение диоксида углерода из атмосферы [Курбатова с соавт., 2004].

Аналогичные данные о газообмене диоксида сфагноума были получены нами на верховом болоте в Тверской области на гряде со сплошным покровом сфагноума и со средним участием трав и кустарничков [Tatarinov et al., 2003]. По нашим данным, полученным на исследуемой пробной площади в 1986 г. в Угличском районе при уровне грунтовых вод 5-8 см при измерении потока диоксида по накоплению в экспозиционной камере газоанализатором ГИП-7 (Россия) в темной камере интенсивность эмиссии CO₂ с поверхности сфагноума составила 600±100 мг CO₂ м⁻² ч⁻¹ (3.8±0.6 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹) [Молчанов, 1987].

В Республике Коми, на мезоолиготрофном болоте, при измерении методом светлой камеры в дневное время NEE мочажины олиготрофного участка в июне-июле составил от 123 до 132 мкг С м⁻² с⁻¹ (2.8 до 3.0 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹), а в ночное время эмиссия составил 52-77 мкг м⁻² с⁻¹ (1.2 - 1.7 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹). В осоко-сфагнувом сообществе с доминированием *Carex rostrata* NEE был 327 мкг м⁻²с⁻¹ (7.5 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹) [Михайлов, 2013], т.е. в северной тайге значения NEE болота были ниже, чем в настоящем исследовании в южной тайге. В Западной Сибири в южной тайге NEE мохового покрова на открытых болотах олиготрофного и мезотрофного питания в два раза выше, чем в северной и средней тайге [Наумов, 2009].

Рассмотрим, как изменяется NEE мохового покрова в зависимости от поступления солнечной радиации при разных уровнях грунтовых вод (рис. 2). Результаты экспериментальных исследований показали значительную изменчивость NEE мохового покрова. Когда УПГВ находился на небольшой глубине от поверхности (4-7 см) наблюдалось отрицательные значения NEE мохового покрова, которое выражалось логарифмической зависимостью от солнечной радиации (табл.), при солнечной радиации больше 100 Вт м⁻² величина NEE мохового покрова составляла 0.5÷1.0 мкмоль м⁻² с⁻¹. Близкие величины зависимости NEE мохового покрова от интенсивности ФАР были получены в Республике Коми методом EDDY Covariance в осенний период NEE составили в среднем от 15 до 30 мкг м⁻²с⁻¹ (0.34-0.68 мкмоль CO₂ м⁻²с⁻¹) [Михайлов с соавт., 2013].

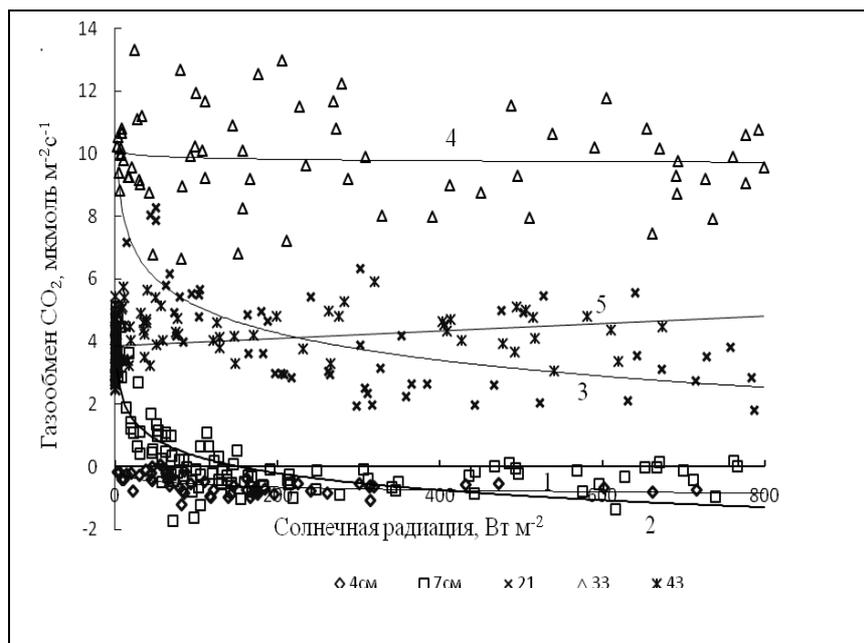


Рис. 2. Зависимость NEE мохового покрова от солнечной радиации: 1 – май 2009 г при – УПГВ = 4см; 2 – июнь 2009 г при – УПГВ =7см; 3 – август 2009 г при – УПГВ = 21 см; 4 – июль 2009 г при – УПГВ = 30 см; 5 – август 2011 г при – УПГВ = 43см.

Табл. 1. Уравнения зависимости NEE мохового покрова от солнечной радиации и температуры воздуха и дыхания почвы при разных уровнях почвенно-грунтовых вод (УПГВ).

Показатели	УПГВ, см	Уравнение		Коэффициент детерминации (R ²)	
		Дыхание почвы	NEE мохового покрова	Дыхание почвы	NEE мохового покрова
Зависимость от температуры	4	$y = 0.277\ln(x) - 0.6114$	$y = -0.138\ln(x) - 0.1292$	0.150	0.007
	33	$y = 3,2146\ln(x) - 5.0436$	$y = 3.5518\ln(x) - 1.4968$	0.714	0.300
	43	$y = 0.908\ln(x) - 0.221$	$y = 0.8185\ln(x) + 1.7155$	0.264	0.116
	21	$y = 1.9205\ln(x) - 3.6096$	$y = -2.021\ln(x) + 10.142$	0.197	0.021
	7	$y = 2.9659\ln(x) - 4.0307$	$y = -3.678\ln(x) + 10.832$	0.668	0.454
Зависимость от солнечной радиации	43	$y = 0.0014x + 1.914$	$y = 0.0016x + 3.7656$	0.191	0.115
	21	$y = 0.0176\ln(x) + 1.9547$	$y = -1.253\ln(x) + 10.912$	0.002	0.468
	4	$y = -0.2\ln(x) + 1.3632$	$y = -0.136\ln(x) + 0.0645$	0.274	0.306
	7	$y = -1E-05x^2 + 0.0099x + 3.3735$	$y = -0.785\ln(x) + 3.9521$	0.345	0.773
	33	$y = 0.0007x + 4.9242$	$y = -9E-05x + 9,9298$	0.038	0.006
От температуры в ночной период	7	$y = 4.9855\ln(x) - 6.0732$	$y = 7.7786\ln(x) - 9.458$	0.445	0.853
	43	$y = 0.6833\ln(x) + 0.1474$	$y = 1.7305\ln(x) - 1.1717$	0.16	0.675

При снижении УПГВ до 21 см NEE мохового покрова становится положительным, однако влияние солнечной радиации еще наблюдается, которая также выражается логарифмической зависимостью. Если при 100 Вт м⁻² NEE мохового покрова был 6 мкмоль СО₂ м⁻² с⁻¹, то при солнечной радиации 500 Вт м⁻² стал 3 мкмоль СО₂ м⁻² с⁻¹. Со снижением УПГВ до 33 см и увеличением влажности верхнего слоя мохового покрова значение NEE значительно увеличилось, до -10 мкмоль СО₂ м⁻² с⁻¹, однако солнечная радиация в этом случае уже не оказывала влияния. При УПГВ на глубине 43 см, в связи с пересыханием верхнего слоя мохового покрова величины NEE значительно снизились и составили от 4 до 6 мкмоль СО₂ м⁻² с⁻¹. Таким образом, NEE мохового покрова при разных значениях УПГВ также в значительной степени зависит от влажности мохового покрова и почвы.

Влияние влажности сфагнома на интенсивность фотосинтеза сфагнома было изучено широким рядом авторов, однако, в основном эти работы проводились в лабораторных условиях. На Аляске, в июле-августе содержание воды в 2 см верхней части сфагнома было от 7.2 до 10 г Н₂О (г⁻¹ сух вещества) при средней скорости нетто-фотосинтеза 1 мг СО₂ г⁻¹ ч⁻¹ [Harley et al., 1989], т. е. в условиях Аляски практически в течение вегетационного периода наблюдается оптимальная для сфагнома влагообеспеченность. По-видимому, по этой же причине в северной Финляндии на заболоченных территориях в Субарктике уровень грунтовых вод не влияет на валовое темновое дыхание и нетто экосистемный СО₂ обмен. Heikkinen et al. [2002] и Loser et al. [2012] на основе анализа литературы пришли к выводу, что для высокоширотных торфяников фотосинтетически активная радиация, интегрированная за вегетационный период, была основным фактором роста *Sph. fuscum*, а запас эффективной влаги только коррелировал с ростом. По-видимому, в условиях высоких широт влагообеспеченность была вполне достаточной.

По данным многих исследователей, максимальная интенсивность фотосинтеза у разных видов сфагнома достигала 2.0-2.8 мг СО₂ г⁻¹ ч⁻¹ при его влажности от 750-2500% от сухого вещества, а при влажности 200-300% наблюдалась компенсация фотосинтеза. При избыточном увлажнении сфагнома, более 2000%, интенсивность фотосинтеза снижается и составляет 30-50% от максимальной величины у разных видов [Schipperges and Rydin, 1998; Jauhainen and Silvola, 1999; Harley et al., 1989].

По данным американских исследователей при уровне грунтовых вод от 0 см до 2 см наблюдается точка компенсации фотосинтеза. Точка компенсации фотосинтеза обнаружена у *Sph. fallax* также и при уровне грунтовых вод глубже 50 см, а у *Sph. nemoreum* – при уровне грунтовых вод 70 см. Когда вода стоит на поверхности, газообмен прекращается [Titus et al., 1983].

Таким образом, можно предположить, что в средней и северной тайге содержание воды в сфагноме в месте обитания растений является оптимальным, тогда как в южной тайге, где возможно значительное изменение УПГВ, влагообеспеченность сфагнома и влажность почвы является одним из основных факторов, влияющих на NEE сфагновых биогеоценозов.

Рассмотрим, как меняется NEE мохового покрова и дыхание почвы в зависимости от температуры воздуха с изменением УПГВ (рис. 3). При УПГВ 4 см, когда большая часть сфагнома находится под водой, как NEE мохового покрова, так и дыхание почвы практически не зависели от температуры воздуха. В этих условиях наблюдалось небольшое отрицательное значение NEE мохового покрова около $0.5 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Дыхание почвы в этих условиях составило примерно $0.2 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. С опусканием УПГВ до 7 см и увеличением температуры воздуха величины NEE мохового покрова при температуре выше 17°C имели отрицательные значения, а до 17°C наблюдалась положительные. Дыхание почвы при таком уровне грунтовых вод было наиболее высокой, демонстрируя логарифмическую зависимость от температуры воздуха, меняясь от 2 до $6 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (табл.).

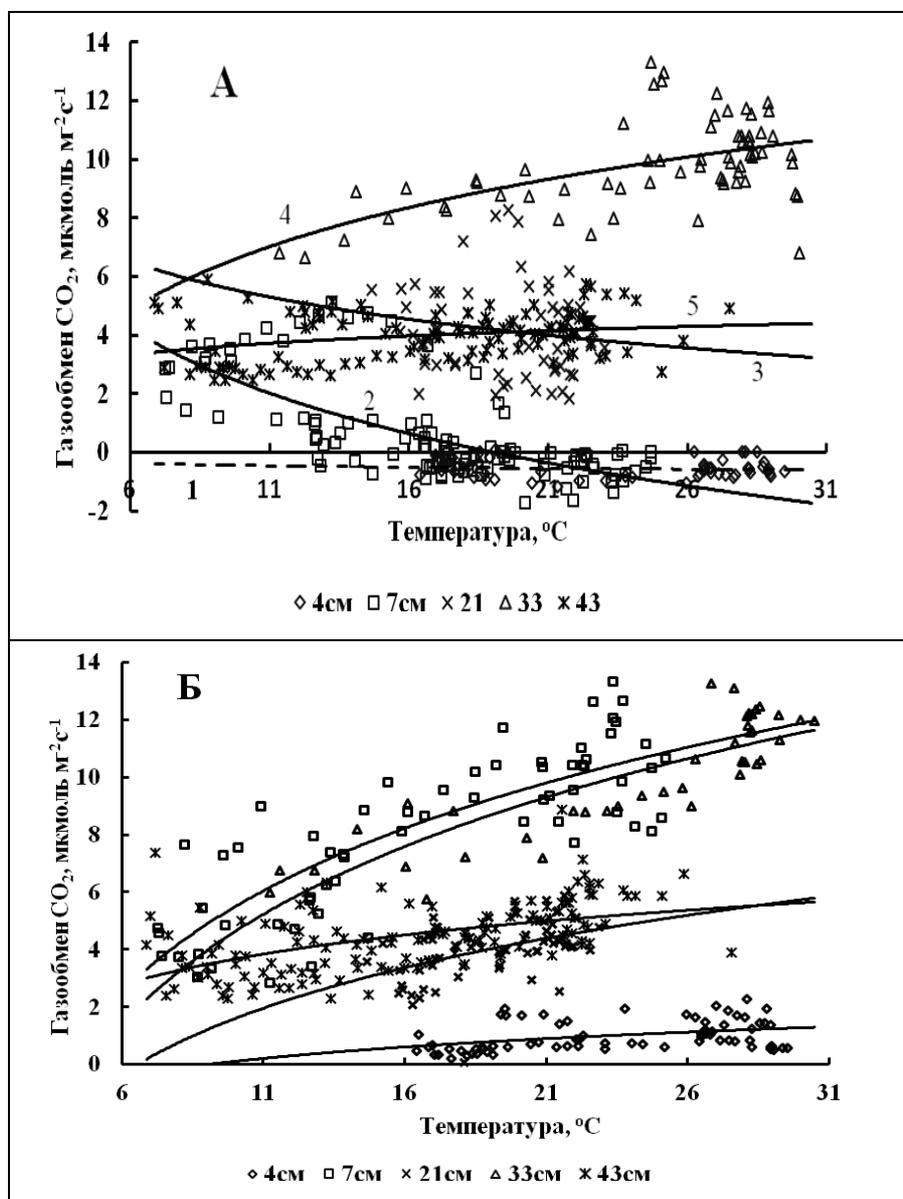


Рис. 3. Зависимость NEE мохового покрова в дневное время (А) и дыхания почвы (Б): от температуры воздуха: 1 – май 2009 г при – УПГВ = 4см; 2 – июнь 2009 г при УПГВ = 7см; 3 – август 2009 г при – УПГВ = 21 см; 4 – июль 2009 г при – УПГВ = 33 см; 5 – август 2011 г при УПГВ = 43см. Температура почвы = 14 – 17°C .

При уровне почвенно-грунтовых вод 21см у NEE мохового покрова логарифмически зависимость от температуры, как и при УПГВ 7см, но положительные значения (эмиссия диоксида углерода) были значительно выше и менялись в зависимости от температуры от 3.5 до 6.0 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Дыхание почвы при таком УПГВ снизилась почти в два раза и составила от 0.5 до 3.0 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

При УПГВ 33 см, в связи с недавними обильными дождями, отрицательные значения NEE мохового покрова значительно выросли: NEE мохового покрова составил в зависимости от температуры от -6 до -10 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а дыхание почвы изменилось от 2 до 6 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При снижении УПГВ до 43 см NEE мохового покрова и дыхание почвы в сухой период слабо зависели от температуры и их значения значительно снизились. NEE мохового покрова меняется от 3 до 4 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а дыхание почвы от 2 до 3 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. По-видимому, в этих условиях продукция CO_2 обеспечивалась в основном нижними, еще влажными, слоями торфа.

Зависимость NEE мохового покрова и дыхания почвы от ночной температуры воздуха представлена на рис. 4. Как видно из рисунка, в ночной период, когда освещенность не влияла на потоки диоксида углерода при УПГВ 7 см с изменением температуры воздуха с 7 до 15 °С значения NEE мохового покрова увеличивались с 6 до 12 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а дыхание почвы - от 4 до 8 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При УПГВ 43 см при увеличении температуры с 7 до 18 °С NEE мохового покрова увеличился меньше с 2.5 до 3.5 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а дыхание почвы с 1.5 до 2.0 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

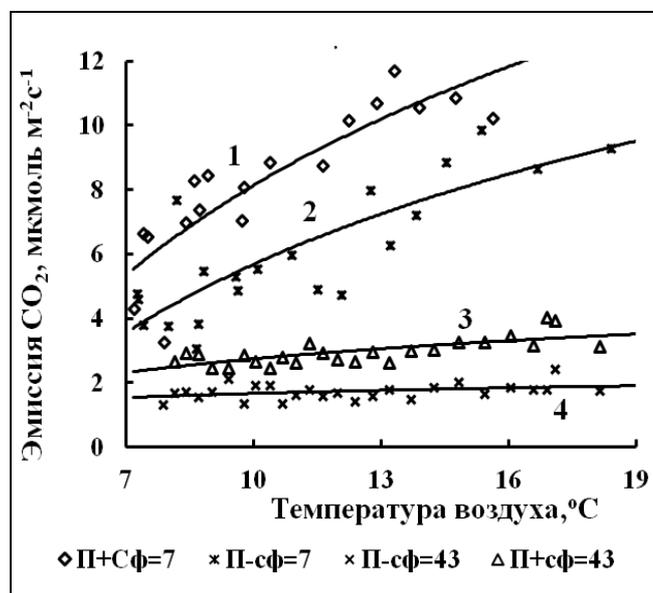


Рис. 4. Зависимость NEE мохового покрова в ночное время – 1 (П+Сф=7); дыхания почвы (П-сф=7) – 2, от ночной температуры при УПГВ=7 см и при УПГВ=43 см, соответственно (П+сф=43) – 3 и (П-сф=43) – 4.

Таким образом, при УПГВ 7 см ночное дыхание сфагнома без почвы (NEE-R_s) в зависимости от температуры воздуха изменялось с 2 до 4 мкмоль $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При УПГВ 43 см ночное дыхание сфагнома без почвы (NEE-R_s) наблюдался в два раза слабее, чем при УПГВ =7см.

На основе полученных данных о NEE мохового покрова и дыхании почвы и динамики метеофакторов были рассчитаны уравнения зависимости NEE мохового покрова и дыхания почвы от солнечной радиации, температуры воздуха при разных УПГВ, графически представленных на рис 2, 3, 4 и (Табл.). В таблице представлены уравнения зависимости газообмена изучаемых участков. Уравнения регрессии были подобраны из обычно используемых в физиологии и по визуальным характеристикам зависимостей.

Проведенный однофакторный дисперсионный анализ выявил значимую зависимость NEE мохового покрова от всех принятых во внимание переменных: температуры и влажности воздуха, солнечной радиации, а также УПГВ. Критерий Фишера F NEE мохового покрова и уровня грунтовых вод – 348, температуры воздуха – 2013, влажности воздуха – 2311, солнечной радиации – 257, при F критическом – 3.87. Таким образом, NEE мохового покрова оказалась наиболее чувствительной к влажности и температуре воздуха, и в меньшей степени, к УПГВ и солнечной радиации, однако значения F от этих переменных также довольно высоки.

На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны уравнения зависимости NEE мохового покрова (NEE_{sph}) от совокупности всех учтенных внешних факторов - солнечной радиации, температуры и влажности воздуха и УПГВ. Использовалась множественная нелинейная регрессия, при этом вид уравнения и состав независимых переменных подбирался на основе визуального анализа зависимостей от отдельных переменных и по более высокому значению коэффициента детерминации, коэффициенты уравнения подбирались программой *Exzel* (поиск решения):

$$NEE_{sph} = \exp(a \cdot Q + b) + c \cdot Hr + d \cdot Hr^2 + e \cdot T + f \cdot T^2 + g \cdot WL + h \cdot WL^2 + i \quad n=313 \quad r^2=0,83 \quad (2)$$

$a = -0.0069$; $b = -0.0311$; $c = 0.00025$; $d = -1.0004$; $e = 0.02789$; $f = 0.826654$; $g = -0.014$; $h = 3.69931$; $i = 0.45065$.

где: Q – солнечная радиация; Hr – влажность воздуха; T – температура воздуха; WL – уровень поверхностных грунтовых вод.

Показатели газообмена, вычисленные при разных внешних условиях по этой формуле, соответствовали экспериментальным данным (рис. 5).

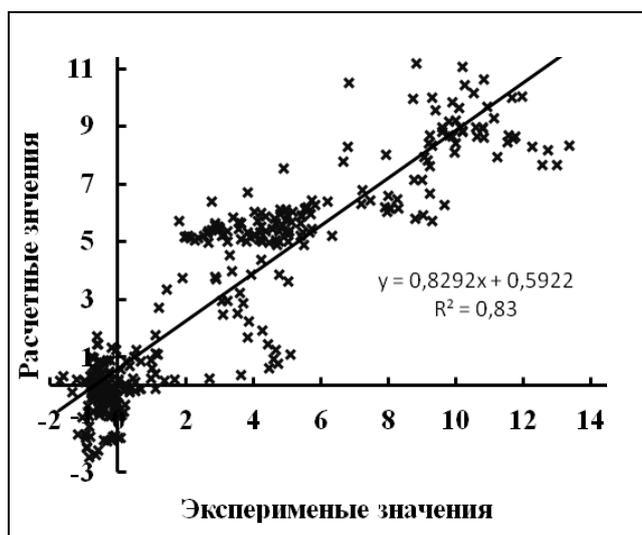


Рис. 5. Взаимосвязь экспериментальных и расчетных данных NEE мохового покрова ($\text{мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{с}^{-1}$) в различных условиях (температуры воздуха, влажности воздуха, солнечной радиации и уровня поверхностных грунтовых вод).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование показало, что в условиях южной тайги на олиготрофных сфагновых болотах зависимость NEE мохового покрова и дыхания почвы от метеофакторов в значительной степени определяется уровнем поверхностных грунтовых вод.

УПГВ сильно влияет как на интенсивность, так и направленность газообмена (поглощение или выделение CO_2), так и на зависимость этого процесса от внешних факторов - солнечной радиации и температуры воздуха.

Солнечная радиация неравнозначно влияет на NEE мохового покрова. Так при УПГВ от 4 до 21 см NEE мохового покрова показывает логарифмическую зависимость от нее. Однако при УГВ 21 см NEE мохового покрова становится положительным и вместо поглощения CO_2 наблюдается его эмиссия, которая при солнечной радиации свыше 200 Вт м^{-2} значительно уменьшается. При УПГВ ниже 30 см NEE мохового покрова не зависит от влияния солнечной радиации. Увеличение влажности в результате значительного выпадения осадков привело к увеличению положительных значений NEE мохового покрова. Дальнейшее понижение УПГВ в сухой период приводит к снижению положительных значений NEE мохового покрова. Влияние температуры на NEE мохового покрова и дыхание почвы при разных значениях УПГВ также неоднозначно. Так, при УПГВ 7 и 21 см и увеличении температуры воздуха NEE мохового покрова снижается, тогда как интенсивность дыхания почвы увеличивается. При УПГВ 43 см на обоих участках влияние температуры было незначительным. При таком УПГВ положительные значения NEE мохового покрова за счет живого сфагнома составляет около 1/3 от дыхания почвы. Влияние температуры на NEE мохового покрова при уровне грунтовых вод от 7 до 33 см не однозначно. Если при снижении УПГВ от 7 до 21 см NEE

мохового покрова с увеличением температуры воздуха снижается, что обусловлено фотосинтетической деятельностью сфагноума, то при УПГВ 43 см влияние температуры практически не сказывается. Последнее, по-видимому, связано с пересыханием сфагноума и верхнего слоя торфа. Температура оказывает существенное влияние на дыхание почвы в диапазоне УПГВ от 7 до 33 см. С увеличением температуры от 10 до 20 °С дыхание почвы увеличивается примерно в два раза. При снижении УПГВ до 43 см влияние температуры воздуха на дыхание почвы ослабевает, при увеличении температуры на 10 °С дыхание почвы увеличивается меньше, чем на 40%. При УПГВ 4 см дыхание почвы незначительно (около 0.2 мкмоль CO₂ м⁻² с⁻¹). Наиболее высокие значения NEE мохового покрова наблюдается при УПГВ, равном 7 см, и при интенсивности солнечной радиации 150 -700 Вт м⁻², NEE мохового покрова составляет 0 - 4 мкмоль CO₂ м⁻² с⁻¹.

При УПГВ 7 и 21см, и увеличении температуры воздуха NEE мохового покрова снижается, тогда как дыхание почвы увеличивается. Можно считать, что при таком уровне почвенно-грунтовых вод положительные значения NEE мохового покрова за счет живого сфагноума составляют 1/3 от дыхания почвы, и она на 2/3 обусловлена дыханием почвы. При УПГВ 43см на обоих участках влияние температуры незначительно.

Кроме влияния факторов окружающей среды на NEE мохового покрова в результате изменения УПГВ большое влияние имеет изменение массы торфа (почвы), участвующей в газообмене, так как в водной среде разложение торфа (дыхание почвы) практически отсутствует.

Такое влияние УПГВ на NEE мохового покрова наблюдается только в подзоне южной тайги, а в условиях средней и северной тайги, а также в Арктике, как видно из литературных данных, УПГВ и влажность сфагноума и почвы мало влияют на NEE мохового покрова.

Таким образом, прогнозируемое снижение УПГВ в заболоченных лесах и сфагновых биогеоценозах южной тайги при потеплении климата приведет к «переключению» NEE мохового покрова с поглощения на выделение диоксида углерода, что приведет к дальнейшему усилению парникового эффекта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен д.б.н. Ю.Л. Цельникер за большую помощь в редактировании представленной статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата», финансируемого в рамках Международной климатической инициативы Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы, строительства и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K Восстановление торфяных болот), а также грантом РФФИ 14-14-00956.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арутюнян С.Г., Уткин А.И. 1986. Биологическая продуктивность и вертикально-фракционная структура естественных средневозрастных древостоев трех типов сосняков // Вертикально-фракционное распределение фитомассы в лесах / Под ред. Исаева А.С., Фрей Т.Э., Орлова А.Я. М.: Наука. С. 163-177.
- Вомперский С.Э. 2009. Влияние современного климата на болотообразование и гидролесомелиорацию // Структура и функции лесов Европейской России / Отв. ред. Уткина И. А. М.: ТНИ КМК. С. 31-51.
- Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А. 2011. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. №5. С. 3-11.
- Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. 2005. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. географ. № 5. С. 21-33.
- Заварзин Г.А., Дедыш С.Н. 2008. Микробные процессы в болотных экосистемах: изменения природных вод под влиянием деятельности микроорганизмов // Изменение окружающей среды и климата природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФЗ РАН. Т. 4. С. 80-96.
- Курбатова Ю.А. 2002. Вертикальные потоки тепла, влаги и углекислого газа на верховом болоте юга Валдайской возвышенности. Автореф. Дис. ...канд. биол. наук. Москва. 27 с.
- Курбатова, Минаева Т.Ю., Татаринов Ф.А., Молчанов А.Г., Русанович Н.Р. 2004. Временная и пространственная изменчивость газообмена CO₂ на верховом болоте южной европейской тайги // Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии / Гл. ред. Н.П. Лавров. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН. С. 41-46.
- Курбатова Ю.А., Авилон В.К., Варлагин А. В., Иванов Д.Г. 2014. Роль экстремальных погодных явлений в CO₂ обмене между атмосферой и заболоченными лесами южной европейской тайги // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Четвёртого Международного полевого симпозиума (Новосибирск, 4–17 августа

- 2014) / под ред. проф., д-ра биол. наук А. А. Титляновой и проф., д-ра биол. наук М. И. Дергачёвой. Томск: Изд-во Том. ун-та. С. 197-198.
- Михайлов О.А. 2013. Сезонная динамика вертикальных потоков CO₂ в приземном слое атмосферы на мезо-олиготрофном болоте средней тайги: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар. 22 с.
- Михайлов О.А., Загирова С.В., Мигловец М.Н., Вилле К. 2013. Потоки диоксида углерода в экосистеме мезоолиготрофного болота в переходный период осень-зима // Сибирский экологический журнал. Т. 20. № 2. С.180-186.
- Молчанов А.Г. 1987. Вынос углекислоты с поверхности напочвенного покрова в сосновых насаждениях // Всесоюзное совещание «Эксперимент и математическое моделирование в изучении биогеоценозов лесов и болот» Тезисы докладов. Москва: Ротапринт ин-та «Союзгипролесхоз». С. 250-253.
- Молчанов А.Г. 2005. Фотосинтетическая продуктивность дубового древостоя в различных условиях водообеспеченности // Физиология растений. Т. 52. № 4. С. 522-531.
- Молчанов А.Г. 2007. Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К. 284 с.
- Молчанов А.Г. 2010. Мониторинг эколого-физиологических показателей в экосистемах. // Серебряноборское опытное лесничество: 65 лет лесного мониторинга. М.: Товарищество Научных Изданий КМК. С. 112-130.
- Молчанов А.Г. 2014. CO₂ древостоев в естественных условиях // Фотосинтетическая деятельность и продукционные процессы фитоценозов. Выпуск 1. Орел: Изд-во ОрелГАУ. С. 63-88.
- Молчанов А. Г. 2015. Газообмен сфагнома при различных уровнях поверхностных грунтовых вод // Экология. № 3. С. 182-188.
- Наумов А.В. 2009. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 208 с.
- Наумов А. В., Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. 1999. Продуцирование CO₂ торфяной почвой слабо осушенного мезотрофного болота в связи с гидротермическими условиями сезона // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. Мат-лы совещания / Отв. ред. Вомперский С. Э., Сиринов А. А. М.: ГЕОС. С. 218-219.
- Ольчев А. В., Волкова Е. М., Каратаева Т. А., Новенко Е. Ю. 2012. Нетто CO₂-обмен и испарение сфагнового болота в зоне широколиственных лесов Европейской части России // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Вып. 3. С. 207-220.
- Татаринов Ф.А., Молчанов А.Г., Ольчев А.В. 2009. Оценка и минимизация ошибок при измерении дыхания почвы по открытой схеме // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 11., №1(7). С. 1592-1595. Edwards N. T., Sollins P. 1973. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components // Ecology. V. 54. N 2. P. 406-412.
- Harley P. C., Tenhunen J. D., Murray K. J., Beyers J. 1989. Irradiance and temperature effects on photosynthesis of tussock tundra *Sphagnum* mosses from the foothills of the Philip Smith Mountains, Alaska // Oecologia. V. 79. P. 251-259.
- Heikkinen J. E. P., Maljanen M., Aurela M., Hargreaves K. J., Martikainen P. J. 2002. Carbon dioxide and methane dynamics in a sub-Arctic peatland in northern Finland // Polar Research. V. 21. N 1. P. 49-62.
- Jauhainen J., Silvola J. 1999. Photosynthesis of *Sphagnum fuscum* at long-term raised CO₂ concentrations // Ann. Bot. Fennici. V. 36 P. 11-19.
- Kurbatova J., Li Ch., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A. 2009. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bog // Environ. Res. Lett. 4 045022
- Loisel J., Gallego-Sala A. V., Yu Z. 2012. Global-scale pattern of peatland *Sphagnum* growth driven by photosynthetically active radiation and growing season length // Biogeosciences. Vol. 9. P. 2737-2746.
- Schipperges B., Rydin H. 1998. Response of photosynthesis of *Sphagnum* species from contrasting microhabitats to tissue water content and repeated desiccation // New Phytol. V 140. P. 677-684.
- Tatarinov F., Kurbatova J., Molchanov A., Minaeva T., Orlov T. 2003. Measuring of components of peat and ground vegetation CO₂ balance in a southern taiga peat bog // Ecophysiological processes in northern wetland. Selected papers of International Conference and Education Workshop Tallin. Estonia 30 June – 4 July 2003. Ed. Argo Jarvet and Elve Lode. Tallin-Tartu. P. 215-220.
- Titus John E., Wagner Daniel J., Stephens Mark D. 1983. Contrasting water relations of photosynthesis for two sphagnum mosses // Ecology. V. 64 (5). P. 1109-1115.
- Zakharova E. A., Kouraev A. V., Garestier F., Rémy F., Kirpotin S. N., Vorobyev S. N., Berezin A. Ye. 2014. Hydrological regime of siberian wetlands from satellite and in-situ observations // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Четвёртого Международного полевого симпозиума (Новосибирск, 4–17 августа 2014) / под ред. проф., д-ра биол. наук А. А. Титляновой и проф., д-ра биол. наук М. И. Дергачёвой. Томск: Изд-во Том. ун-та. С. 42.

GAS EXCHANGE OF CARBON DIOXIDE FROM THE SURFACE OF SPHAGNUM IN BOGGY PINE FORESTS SOUTHERN TAIGA

Molchanov A.G.

Institute of Forest Science RAS, Uspenskoe

We studied the dependence of the gas exchange of carbon dioxide with sphagnum surface from solar radiation and air temperature at different levels water table (LWT). The studies were conducted in the swampy pine forest of the southern taiga in the Yaroslavl region at the station of Forest Institute "Gorodisce". It was found that the nature of carbon dioxide gas exchange of sphagnum and its dependence on other external factors varies with different levels water table. When LWT at a depth of 4-21cm sphagnum absorbs carbon dioxide. The dependence of the absorption of solar radiation is logarithmic. When LWT equal 21cm in exchange for absorption of carbon dioxide is take place

emission, keeping the same form of the process, depending on solar radiation. Emission of carbon dioxide at LWT 30 cm ceases to depend on solar radiation. Its intensity decreases as the further reduction LWT. The air temperature increase at a shallow water table (up to 21 cm) leads to a reduction of carbon dioxide emissions. When LWT below 33 cm increase in temperature increases the release of carbon dioxide, while LWT 45 cm effect of temperature on gas exchange effect is much less.

Thus, the decline LWT below 20 cm leads to a change in the absorption of carbon dioxide of the sphagnum surface on carbon dioxide emissions and a significant reduction in influence as solar radiation and air temperature.

Keywords: carbon dioxide gas, NEE moss, sphagnum moss, soil respiration, levels water table soil, air temperature, solar radiation, southern taiga.

Citation: Molchanov A.G. 2017. Gas exchange of carbon dioxide from the surface of *Sphagnum* in boggy pine forests in southern taiga // Environmental dynamics and global climate change. V. 8. No. 1. P. 43-54.

Поступила в редакцию: 11.10.16
Переработанный вариант: 22.03.2017