

ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ И ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ЭМИССИЮ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С ПОВЕРХНОСТИ ОЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА

Головацкая Е.А., Дюкарев Е. А.

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055 г. Томск, пр. Академический 10/3, golovatskaya@imces.ru*

Представлены результаты исследования суточной эмиссии углекислого газа и содержания CO_2 в атмосфере. Выявлен суточный ход эмиссии CO_2 с поверхности торфяной залежи. Выявлена связь эмиссии CO_2 с метеопараметрами: температура воздуха, атмосферное давление, влажность воздуха, а также с температурой деятельного слоя торфяной залежи.

Введение

Круговорот углерода является одним из важнейших процессов, протекающих в биосфере. Изучая круговорот углерода можно оценить современные условия функционирования экосистем, сделать прогноз на развитие различных экосистем в будущем с учетом возрастающего антропогенного влияния. Динамика содержания углекислоты в атмосфере привлекает внимание различных специалистов, поскольку наблюдается увеличение концентрации CO_2 в атмосфере. В настоящее время она выросла на 25% по сравнению с его концентрацией в первой половине 19 века [1]. Увеличение концентрации парниковых газов может привести к нарушению теплового баланса планеты. Глобальный нагрев атмосферы связывают на 50-55% с углекислым газом, на 15-18% с метаном, на 14% с фреонами и на 18% с другими газами [2]. По имеющимся данным, удвоение количества углекислоты в атмосфере может вызвать повышение планетарной температуры на 3-5⁰С [3-5]. При этом многие исследователи предсказывают сокращение осадков и снижение влажности почвы, причем потепление, как полагают, затронет преимущественно северные широты и проявится в большей мере в зимнее время [5].

Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере связывают с антропогенной деятельностью: сжигание топлива, уничтожение лесов, разрушение лесных подстилок, дернины лугов, степей, осушение болот, окисление гумуса пахотных почв - все эти процессы дают значительное поступление CO_2 в атмосферу [6,7]. По данным межправительственной группы экспертов (IPCC) и результатам индивидуальных исследований ежегодный антропогенный выброс CO_2 в мире равен 5,6 Гт, что составляет около 10% от круговорота углерода в наземных экосистемах [8]. Ежегодный выброс CO_2 в результате промышленной деятельности России составляет всего 11% от мирового выброса (0,65-0,7 Гт). Тогда как, суммарная эмиссия CO_2 из почв России составляет 3,12 Гт углерода, что в 4,5 раза превышает индустриальную эмиссию углекислоты в России. Таким образом, в настоящее время основным источником CO_2 в атмосферу на территории России служит естественная биота.

Однако известно, что из общего потока CO_2 в атмосферу из разных источников примерно половина остается в атмосфере, а вторая половина представляет "неизвестный сток", которым может быть либо океан, либо наземные экосистемы. В результате обмена между атмосферой, растительностью, почвами и океанами, рост концентрации углекислого газа в атмосфере составляет меньше половины его поступления [1]. По мнению Г.А. Заварзина [9], функции наземных экосистем в качестве источников или стоков углекислоты определяются балансом между двумя мощными биосферными процессами - фотосинтетической продукцией органического углерода (C_{орг}) и выделением CO_2 при дыхании и разложении органического вещества.

Учитывая вышесказанное, Россия занимает особое место в глобальной климатической системе благодаря своим уникальным поглотителям (стокам) и накопителям (резервуарам)

парниковых газов. Для России подсчитано, что зеленые растения в процессе жизнедеятельности поглощают 4,4 Гт углерода в год, кроме того, бесспорным стоком CO₂ для территории России служит депонирование углерода в процессе торфообразования на болотах [9].

По содержанию устойчивого Сорг почвы на единицу площади экосистемы России располагаются в ряд: болота, степи, леса [9]. Следовательно, болота играют значительную роль в круговороте углерода. Они являются источниками и стоками парниковых газов, хранителями биологического разнообразия, в болотах сосредоточены большие запасы пресной воды. В последнее время большое внимание уделяется изучению болотных экосистем. Считается, что болота единственные в наземной биоте экосистемы, которые обеспечивают постоянный сток в них углерода. Болота смягчают "парниковый эффект" климата за счет накопления углерода в виде органического вещества торфа. В торфяной залежи находятся основные запасы углерода, кроме того, в болотах происходит связывание углерода на длительный период. Специфичность биосферной функции болот обусловлена незамкнутостью круговорота веществ, т.е. система получает больше вещества и энергии, чем отдает [10].

На долю торфяных болот приходится около 3,5% поверхности земли, что составляет $5 \cdot 10^6$ км², а мировые запасы торфа в углеродном эквиваленте составляют 120-240 млрд.т углерода [10]. По Б. Болину [11] в земном резервуаре органического углерода на долю увлажненных территорий приходится около 15% от его мировых запасов, а по оценкам Е. Горхама [12] только в северных болотах сосредоточено около 1/3 всего количества органического углерода. Мировые оценки углерода торфяных болот колеблются в предельных оценках разных авторов от 145 до 455 млрд. т., из которых не менее трети углеродного пула болот мира приходится на Россию.

Согласно оценкам С.Э. Вомперского с соавт. [13] общая площадь оторфованных земель в России составляет 369 млн. га (21,6% от территории страны), из них болота (со слоем торфа более 30 см) 139 млн. га. В болотах России сосредоточено 100,9 млрд. т углерода, в торфе заболоченных почв - 12,6 млрд. тонн. В целом оторфованные земли представляют один из главных углеродных пулов органического углерода биоты России - 113,5 млрд. т. По данным других авторов содержание депонированного углерода в торфяных болотах России оценивается в 116,5 млрд. т [14] и 118,9 млрд. т [15]. Некоторые различия в цифрах объясняются слабой изученностью торфяных ресурсов России и неодинаковыми методами расчетов.

По активности процессов торфообразования Западная Сибирь названа феноменом заболачивания. В Западной Сибири площадь торфяных болот достигает 42% от территории болот России (30 млн. га), именно на этой территории в болотах сосредоточено 36% от депонированного углерода России [10, 15, 16]. Считается, что процесс торфообразования в Западной Сибири прогрессирует и захватывает около 92 км² ежегодно [17]. По данным А.А. Титляновой с соавт. [18] скорость приращения углерода в торфах Западной Сибири варьирует от 15 до 65 г/м² в год, что приводит к ежегодной аккумуляции 5-20 млн. т углерода в торфяных болотах. Таким образом, согласно литературным данным болота Западной Сибири служат приемником для стока атмосферного CO₂, аккумулируя его в отложениях торфа.

Баланс углерода в биосфере определяется двумя основными процессами: накоплением углерода в процессе фотосинтеза и выделением CO₂ и метана при гетеротрофном дыхании и разложении органического вещества. Зеленые растения аккумулируют углерод, часть которого затрачивается на дыхание самих растений, а остальная часть идет на образование биомассы растений (фитомасса). Образование фитомассы называется продуцированием, а количество органического вещества созданного растениями на единице площади за единицу времени – чистой первичной продукцией (NPP – net primary productivity). При отмирании фитомассы образуется мортмасса, которая разлагается с образованием CO₂ и почвенного органического вещества (ПОВ), одновременно происходит и минерализация ПОВ [19].

В настоящее время известно о важной климатообразующей роли больших болот, связанной с их влиянием на баланс углекислого газа, метана, тепла и влаги в системе. Эмиссия углекислого газа от заболоченных территорий определяется температурой почвогрунтов, уровнем болотных вод, микробиологической и ферментативной активностью торфяной залежи и ее химическим составом. Поэтому изучение законов природы на примере таких комплексов имеет мировое значение.

В прошедшем веке рядом российских и зарубежных учёных были проведены различные исследования Большого Васюганского болота (БВБ), представляющего собой уникальный природный комплекс со слабонарушенной естественной экосистемой. Несмотря на это, влияние БВБ, как устойчивого природного образования, на формирование окружающей среды и климатические изменения остается пока еще слабоизученным фактором. Данный факт значительно ограничивает возможности существующих моделей, описывающих климатические изменения, атмосферные процессы, взаимодействия в системе «земля–биосфера–атмосфера», затрудняет прогнозирование, сдерживает разработку программ по рациональному природопользованию, освоению и устойчивому развитию заболоченных территорий.

Для выявления закономерностей функционирования болотных экосистем и оценки влияния их на биосферу необходимо комплексное изучение различных режимов: оценки углеродного баланса, скорости накопления углерода, гидротермического режима, метеорологические наблюдения, геохимические исследования торфяной залежи и т.д.

Объект исследования

В 2005 г. нами было проведено комплексное исследование болотной экосистемы на примере отрогов Васюганского болота в пределах геофизического стационара «Васюганье» (ИМКЭС СО РАН). Наиболее широко распространенными в южно-таежной подзоне являются сосново-кустарничково-сфагновые болотные биогеоценозы (рямы). Рям – средняя несколько повышенная часть болота с более или менее высокими кочками сфагнового мха, густо поросшая мелкими кустарничками и невысокой (2-3 м) сосной обыкновенной (*P. sylvestris* L.). Эта группа особенно часто встречается в подзоне южной тайги на болотах водораздельных террас. В основном они приурочены к окраинам или хорошо дренированным склонам болот с уклонами поверхности 0,001 – 0,006. Также сосново-кустарничково-сфагновые фитоценозы встречаются и на наиболее выпуклых центральных участках болот.

В качестве объекта исследования выбран участок болота, представленный сосново-кустарничково-сфагновым биогеоценозом – низким рямом.

На ландшафтном профиле водосборной площади р. Ключ (стационара «Васюганье») оборудован пункт наблюдений, расположенный в 180 м от окраины болота. Пункт наблюдений представляет собой типичный низкий рям (сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз с угнетенным древостоем).



Фото 1. Сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз – низкий рям

Микрорельеф волнистый из-за большого количества больших моховых подушек высотой около 30-50 см, диаметром до 3 м.

Растительность низкого рьяма относится к сосново-кустарничково-сфагновой ассоциации с низкой сосной. Угнетенный древесный ярус представлен *Pinus silvestris* f. *Litwinowii*. Средняя высота древостоя – 2-2,5 м, средний диаметр стволов 3 см. Проектное покрытие (п.п.) древесного яруса 30%. Кустарничковый ярус развит обильно на микроповышениях, общее проективное покрытие - 60-70%. Ярус сложен *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L. и *Vaccinium uliginosum* L. На вершинах кочек растет клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus* Turcz.). Травяной ярус имеет п.п. менее 5% и представлен куртинами *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L. и *Drosera rotundifolia* L. В моховом покрове на повышениях доминирует *Sphagnum fuscum* Klinggr. (95%), кроме того, на межкочковых понижениях встречаются *Sph. angustifolium* C. Jens. и *Sph. magellanicum* Brid.

Торфяная залежь низкого рьяма достигает мощности 3 м и имеет смешанный топяной вид строения. В основании залежи лежит слой низинного торфа, который перекрывает мощный (1,5 м) слой верхового торфа двух видов - магелланикум со средней степенью разложения и фускум с низкой степенью разложения. На контакте низинного и верхового пластов располагается тонкая прослойка переходного древесно-сфагнового торфа.

Методы исследования

Комплексные исследования включали в себя: оценки эмиссии CO₂, метеорологические наблюдения, гидротермические исследования торфяной залежи.

Измерения на стационарном пункте наблюдений проводились в следующие периоды: 20-27 июня; 22-29 июля; 17-24 августа; 22-29 сентября. В период с 18 июня по 28 сентября 2005 на стационарной точке проводились инструментальные измерения метеорологических характеристик, при этом использовались следующие приборы:

- автоматический измеритель атмосферного давления и температуры воздуха НОВО Water Level Logger U20-001-01 фирмы Onset corporation (USA),
- автоматическая станция температурного мониторинга почвогрунтов МОДУЛ-Т производства Института географии СО РАН (г. Новосибирск),
- термограф, гигрограф, термометр, напочвенный термометр для измерения температуры и влажности воздуха.

Приборы НОВО и МОДУЛ-Т являются полностью автономными, работают без вмешательства наблюдателя и оснащены системами хранения измеряемых данных. С помощью автономных датчиков были получены длинные ряды значений температуры

приземного воздуха, атмосферного давления и температуры торфяной залежи на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40, 60 и 80 см. Измерения проводятся с дискретностью 15 минут.

С 20 июня были начаты измерения эмиссии CO_2 с поверхности торфяной залежи в круглосуточном режиме по стандартным метеорологическим срокам 7-00, 10-00, 13-00, 16-00, 19-00, 22-00, 1-00, 4-00.

Измерение эмиссии углекислого газа проводили камерным методом, с помощью инфракрасного газоанализатора ОПТОГАЗ 500.4. Газоанализатор предназначен для измерения объемной концентрации CO_2 в атмосферном воздухе. Методика определения эмиссии углекислого газа заключается в следующем: на поверхности торфяной залежи устанавливаются основания из нержавеющей стали с гидрозатвором для исключения газообмена между камерой и окружающим воздухом. На основания устанавливается пластиковая камера, которая сверху покрыта светоотражающим материалом, для избежания нагревания воздуха внутри камеры во время экспозиции. Измеряется содержание газа в камере сразу после ее установки. Выдерживается экспозиция 30 мин, затем через шланг отбирается проба воздуха и анализируется на газоанализаторе. Полученные данные по объемной концентрации CO_2 переводятся в концентрацию CO_2 выраженную в кг/м^3 по формуле (1).

$$C=0.01 \cdot P \cdot X \cdot M/R/T \quad (1),$$

где C - концентрация CO_2 , кг/м^3 ; P – атмосферное давление, Па; X – концентрация CO_2 , %; M – молярная масса газа, кг/моль ; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль/К ; T – абсолютная температура, К.

Параллельно проводится контрольное измерение концентрации CO_2 в атмосфере. В дальнейшем рассчитывается величина потока (скорость эмиссии) CO_2 по соотношению (2):

$$F=(C-C_0) \cdot V/(t \cdot S) \quad (2),$$

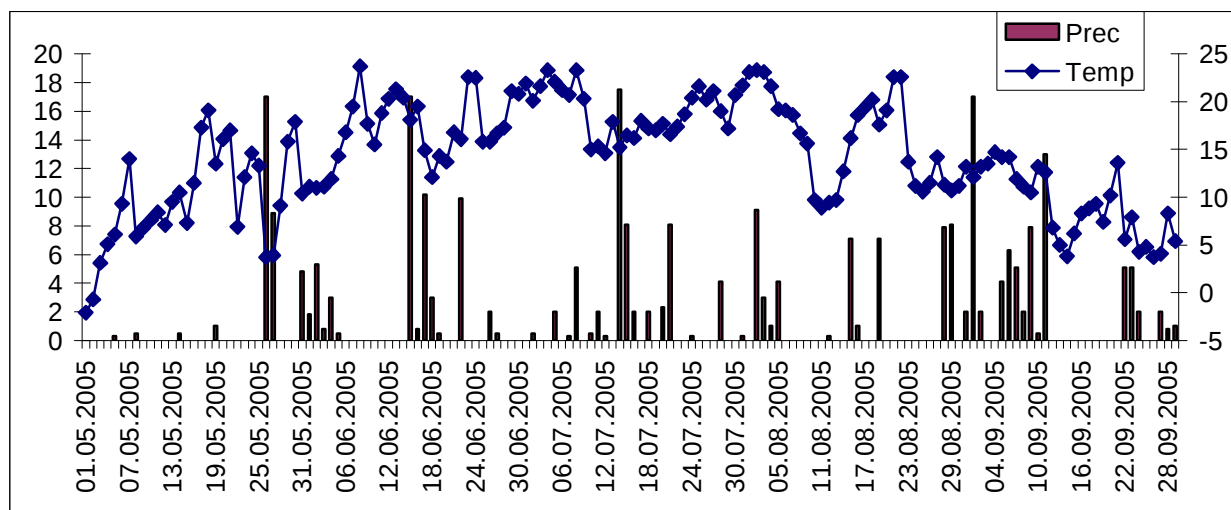
где F – скорость эмиссии, $\text{мг/м}^2 \cdot \text{час}$; C (мг/м^3) – концентрация CO_2 в камере после времени экспозиции - t (час), C_0 – исходная концентрация газа в камере, S (м^2) и V (м^3) – соответственно площадь и объем камеры.

Кроме того, ежемесячно проводился отбор образцов торфа для определения влажности весовым методом (глубина 0-10, 10-20 см), измерялись уровни болотных вод.

Результаты исследования

Метеорологические показатели

Погодные условия вегетационного периода 2005 года по данным метеостанции Бакчар характеризуются как средние по влагообеспеченности (рис. 1), гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) равен 1,16 (таблица 1). Особенностью вегетационного периода были очень сухой май (ГТК = 0,08) и переувлажненный сентябрь (ГТК = 3,24). По сумме активных температур (среднесуточная температура выше 10°C) погодные условия близки к среднемноголетним, полученным для этого региона за последние 6 лет, 1939,4 и 1922,2 $^\circ\text{C}$, соответственно, тогда как количество осадков (255,3 мм) превышает среднемноголетние (180 мм) в 1,5 раза.



**Рис.1. Температура и осадки для метеостанции Бакчар
за период с 1.05.по 29.09.2005 г.**

Таблица 1.

Погодные условия и гидротермический коэффициент

Месяц	Σ температур > 10 °С	Σ осадков за период с T>10 °С	ГТК
май	192.7	1.5	0.08
июнь	521.9	60.1	1.15
июль	589.7	55.4	0.94
август	456.9	50.4	1.10
сентябрь	178.2	57.9	3.25
за год	1939.4	225.3	1.16
средне многолетнее	1922.2	180.2	0.95

В период с 18 июня по 28 сентября 2005 на стационарном пункте проводились инструментальные измерения метеорологических характеристик.

Автоматический измеритель атмосферного давления и температуры воздуха НОВО Water Level Data Logger был размещен на стационарном пункте наблюдений на уровне 2 м над поверхностью болота. На рисунке 2 приведены результаты измерений атмосферного давления и температуры воздуха в период с 18 июня по 27 сентября 2005 года. Температура воздуха имеет четко выраженный суточный ход, суточная динамика атмосферного давления не прослеживается. За экспедиционный сезон 2005 года температура воздуха менялась от 35.1 °С (8 июля в 16:45) до -6.6 °С (20 сентября в 6:45), а атмосферное давление – от 728,8 мм.рт.ст (24 июня в 20:00) до 762.3 мм.рт.ст. (18 сентября в 11:00). В таблице 2 приведены статистические характеристики среднесуточных параметров. Ряды среднесуточных температур воздуха и максимальных/минимальных суточных температур хорошо коррелированы между собой. Коэффициент корреляции между температурой и давлением – отрицательный.

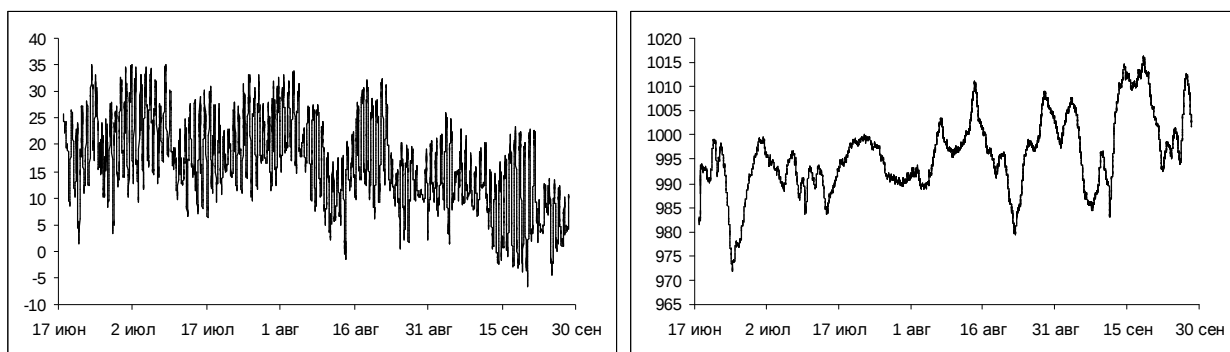


Рис.2. Ход температуры воздуха (°C) и атмосферного давления (гПа) летом 2005 года по данным измерений датчиком НОВО.

Таблица 2.

Статистические характеристики среднесуточных температуры воздуха и атмосферного давления, минимальной и максимальной суточных температур.

	Т, °C	Р, гПа	Т min, °C	Т max, °C
Среднее	16.02	995.99	8.00	24.81
СКО	5.71	7.60	5.71	6.64
Мин	3.05	975.86	-6.63	9.67
Макс	25.40	1014.23	18.52	35.12
Корреляция с Т		-0.56	0.85	0.92

Максимальная амплитуда суточного хода температуры приходится на начало июля (30 июня-08 июля - самый теплый период, когда наблюдались наибольшие дневные температуры) и конец сентября (13-20 сентября– период с ночными заморозками). Например, 20 сентября разница между максимальной дневной (23.0 °C) и минимальной ночной температурой (-6,6 °C) составила 29,6 °C.

Нами было проведено сравнение показаний датчика НОВО и среднесуточных метеохарактеристик, измеряемых на метеостанции Бакчар (см. рис. 3, табл.3). Несмотря на то, что эти пункты наблюдения удалены друг от друга более чем на 30 км, ход атмосферного давления в них практически идентичен. Средняя за сезон разница в показаниях датчика НОВО и измерений на метеостанции Бакчар составляет 0.4 гПа (см. табл.3, рис.4). Температура воздуха на болоте, в среднем, выше на 0.7 °C, причем максимальные дневные значения выше на 3.6 °C, а минимальные ночные температуры на болоте ниже на 0,9 °C. Столь существенная разница в температуре приземного воздуха, особенно в дневное время может быть связана с влажностью воздуха на болоте.

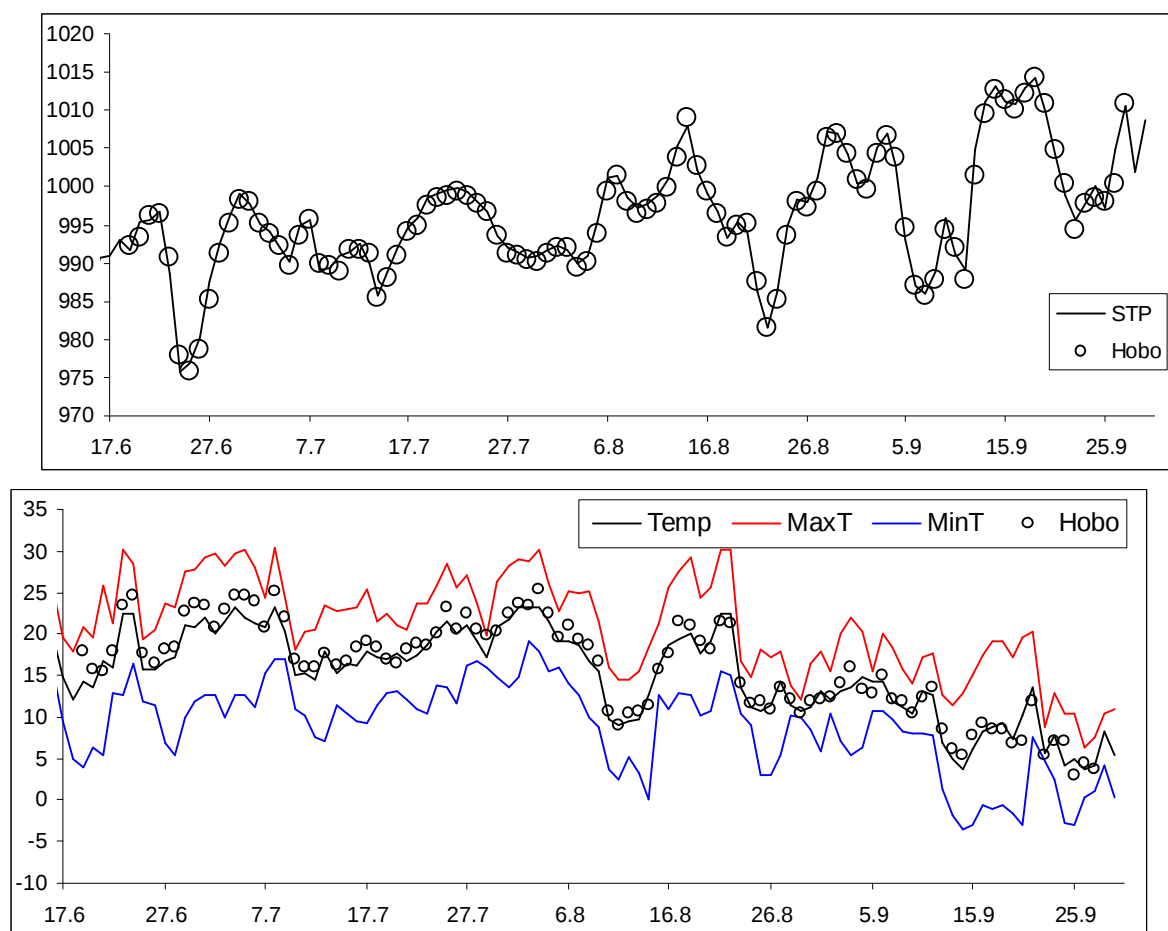


Рис. 3. Сравнение временного хода атмосферного давления и температуры по данным измерений на метеостанции Бакчар и с датчика НОВО.

Таблица 3.

Средние за экспедиционный сезон характеристики погоды по данным метеостанции Бакчар.

	Температура (°C)	Точка росы (°C)	Давление на уровне станции (гПа)	Скорость ветра (м/с)	Макс. Т (°C)	Мин. Т (°C)	Осадки (мм)
Среднее	15.14	10.79	996.53	2.31	21.03	8.71	195.90
СКО	5.40	5.47	7.67	0.99	5.93	5.52	3.50
Мин	3.70	-1.30	975.80	0.40	6.30	-3.50	0.00
Макс	23.30	19.90	1014.30	6.10	30.40	19.10	17.50
Корреляция с температурой	1	0.93	-0.59	-0.08	0.95	0.87	

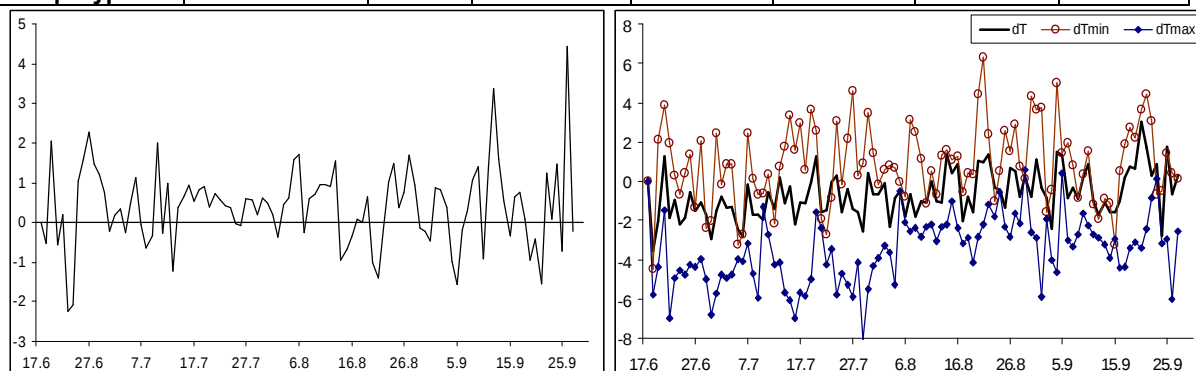


Рис. 4. Разность показаний датчика НОВО и измерений на метеостанции Бакчар.

Таблица 4.

Разность показаний датчика НОВО и измерений на метеостанции Бакчар.

Станция – точка	Температура (°C)	Давление (гПа)	Максимальная Т (°C)	Минимальная Т (°C)
Среднее	-0.68	0.39	-3.55	0.87
СКО	1.22	1.02	1.69	2.01
Мин	-3.57	-2.25	-8.06	-4.48
Макс	3.02	4.43	0.57	6.32

С помощью станция температурного мониторинга почвогрунтов МОДУЛ-Т проводилось исследование температурного режима торфяной залежи на стационарном пункте исследований.

Станция температурного мониторинга МОДУЛ-Т размещена на стационарной точке на болоте 17 июня. На рисунке 5 представлен временной ход температуры торфяной залежи на разных глубинах. Суточные колебания температуры проникают на глубину до 15-20 см, при этом их амплитуда существенно снижается.

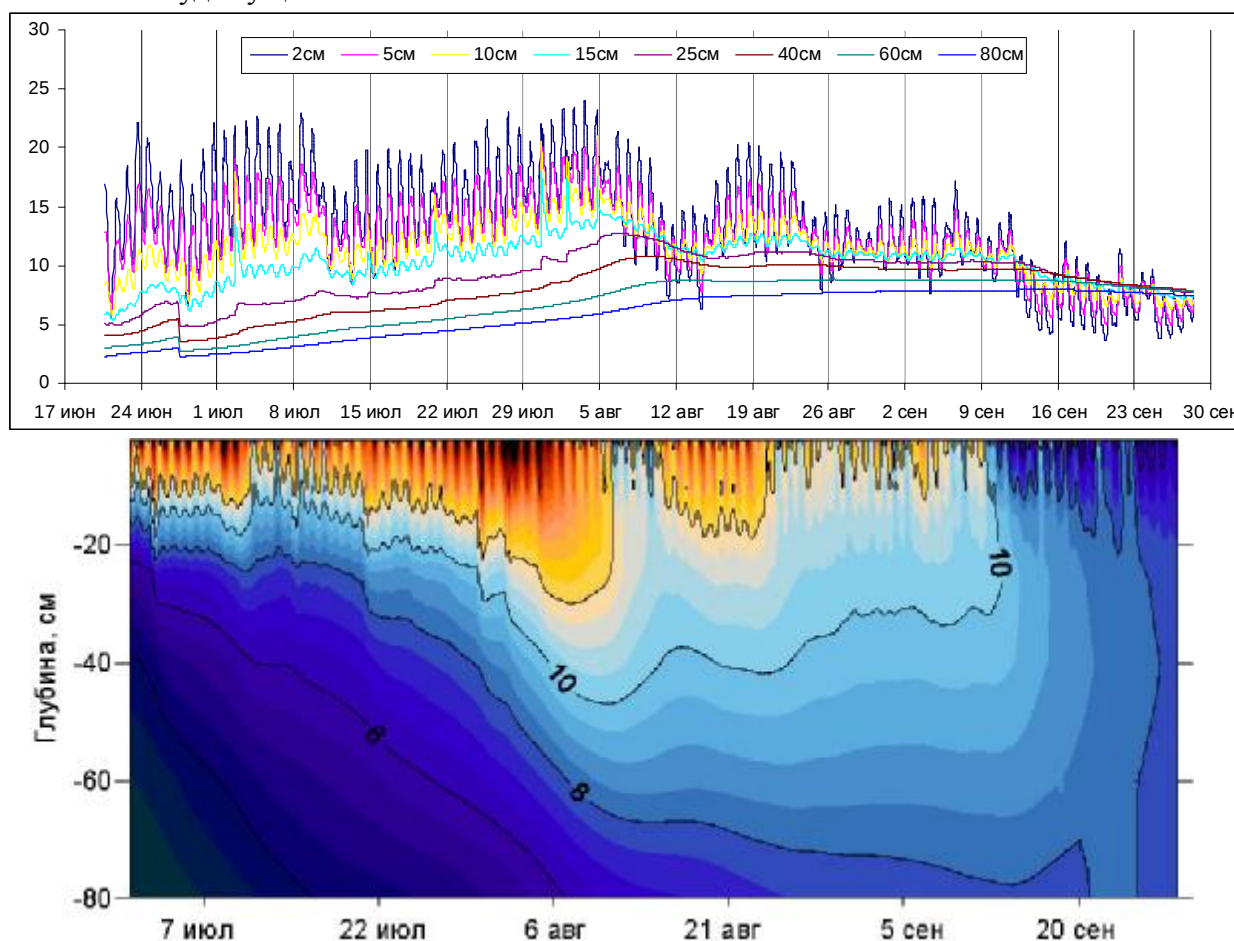


Рис.5. Временной ход температуры торфяной залежи на разных глубинах.

На более глубокие слои торфяной залежи суточные колебания температур проникают с некоторым запаздыванием. Так, максимум на глубине 15 см запаздывает по времени, относительно максимума на глубине 2 см, примерно на 6 часов. Глубже 17-18 см располагаются болотные воды, и температура в нижележащих слоях меняется медленнее. На временном ходе температуры, например 30 июля и 2 августа, на глубинах 15 и 20 см наблюдается скачкообразный рост температуры, после чего температура медленно спадает. Столь «стремительный» прогрев торфяной залежи связан с выпадением осадков и их

фильтрацией вглубь. Данный механизм прогрева глубинных слоев почвогрунтов, по-видимому, характерен для болотных экосистем, в связи с высокой пористостью верхних слоев мха и слаборазложившегося торфа. Максимальная глубина прогрева торфяной толщи до 10 °С составляет примерно 45 см, и приходится на 7 августа. На глубине 80 см температура растет до середины сентября и достигает 8 °С.

После 13-го сентября произошло резкое снижение температуры приземного воздуха, и температура в приповерхностных слоях оказалась ниже температуры на глубине, в результате чего поток тепла меняет свое направление и начинается постепенное остывание торфяной залежи. В таблице 5 приведены статистические характеристики рядов температуры торфяной залежи на разных глубинах.

Таблица 5.

Статистические характеристики рядов температуры на разных глубинах.

Глубина, см	2	5	10	15	25	40	60	80
Среднее	13.18	12.41	11.49	10.52	9.29	8.20	7.00	6.02
СКО	4.39	3.32	2.39	1.84	1.88	2.01	2.02	1.94
Мин	3.69	4.94	5.89	5.42	4.82	3.56	2.71	2.25
Макс	24.00	20.76	20.97	18.01	12.71	10.73	8.85	7.96
Корреляция								
2	1.00	0.98	0.85	0.54	0.04	-0.23	-0.41	-0.49
5		1.00	0.93	0.67	0.14	-0.15	-0.35	-0.45
10			1.00	0.88	0.41	0.11	-0.12	-0.24
15				1.00	0.78	0.54	0.32	0.18
25					1.00	0.94	0.81	0.71
40						1.00	0.96	0.90
60							1.00	0.99
80								1.00

Измерения уровня болотных вод показали, что уровень болотных вод в течение вегетационного периода изменяется слабо (рис.6) и составляет в среднем 15 см от поверхности торфяной залежи. Наиболее высокий уровень воды наблюдается в мае после периода снеготаяния, июнь, июль и август характеризуются незначительными колебаниями уровня болотных вод, вызванными осадками.

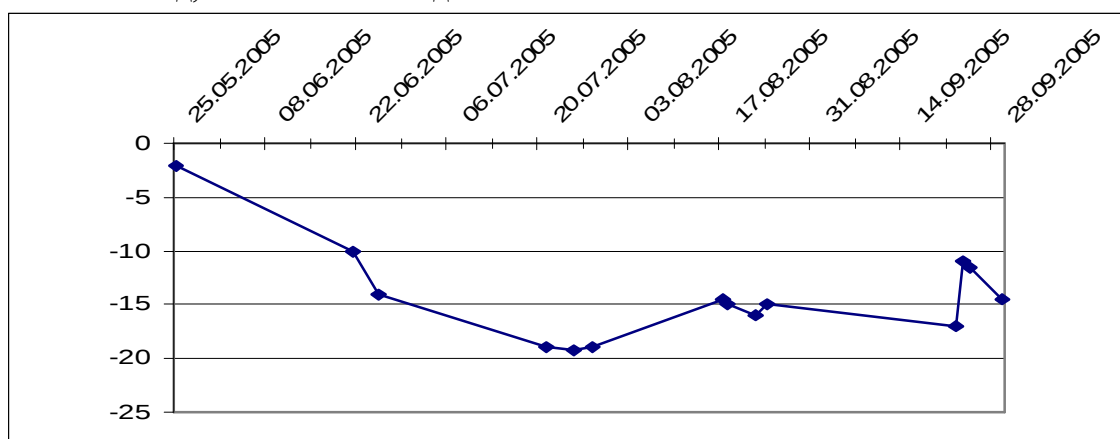


Рис.6. Динамика уровня болотных вод

Суточная динамика УБВ прослеживается только в случае ливневых дождей, когда наблюдается резкий подъем уровня болотных вод, либо в результате затяжных дождей (сентябрь), то же самое можно сказать и о влажности верхнего деятельного слоя торфа (рис. 7). Заметные изменения наблюдаются только в верхнем 10 см слое торфяной залежи от 95 до 92 %. В слое 10-20 см влажность торфа практически не изменяется и составляет в среднем

95,7 %. Слой 10-20 см можно считать влагонасыщенным, так как на глубине 15-18 см находятся уровни болотных вод, коэффициент корреляции между уровнем болотных вод и влажностью торфа на глубине 10-20 см равен 0,53, тогда как влажность верхнего 10 см слоя торфа зависит от количества осадков и температуры воздуха.

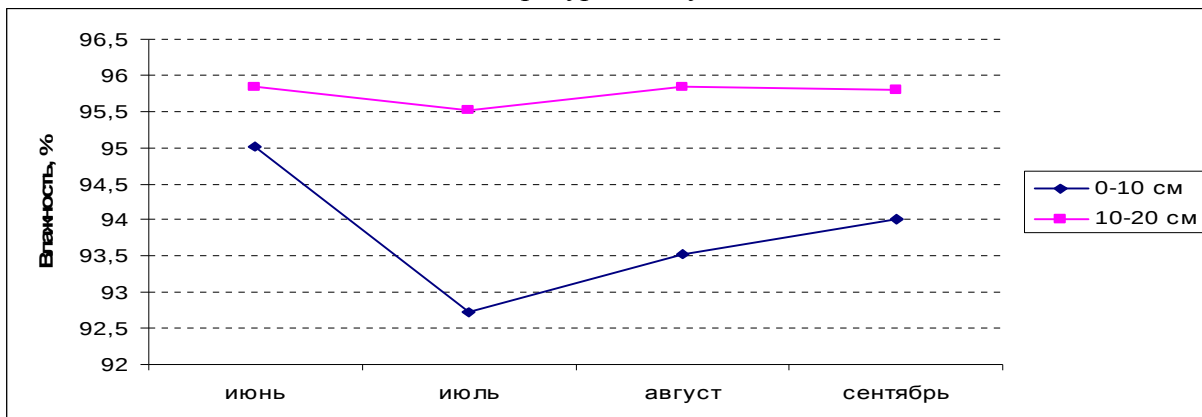


Рис.7. Динамика влажности торфа

Результаты исследования эмиссии CO₂

В течение полевого периода были проведены наблюдения за потоками углекислого газа на стационарном пункте наблюдений. Проводились круглосуточные наблюдения в стандартные метеорологические сроки. Исследование динамики выделения CO₂ позволило выявить суточный ход эмиссии CO₂ (Рис.8). В среднем для всего периода исследования максимум выделения углекислого газа приходится на 19 часов, а минимум на 7 часов утра, средняя амплитуда среднесуточных колебаний эмиссии CO₂ составляет 34 мгCO₂/м²час.

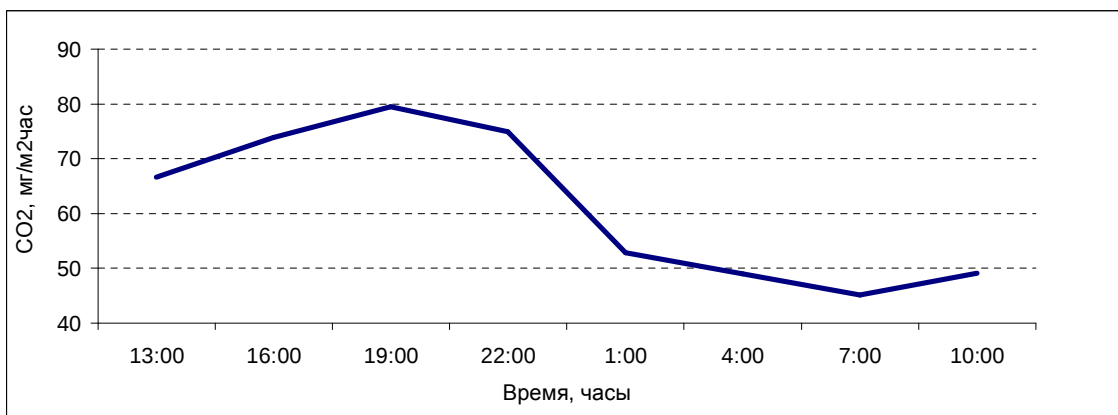


Рис. 8. Среднесуточный ход эмиссии CO₂

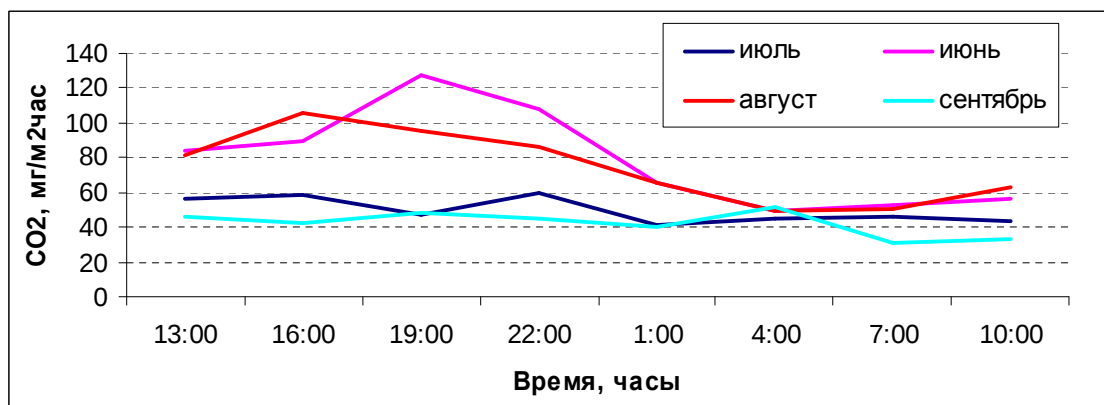


Рис. 9. Среднесуточный ход эмиссии CO₂ в отдельные месяцы

В отдельные месяцы наблюдается существенное различие суточного хода эмиссии CO_2 , что по-видимому определяется погодными условиями, так, минимальная эмиссия характерна для сентября, так как в этом месяце наблюдаются низкие температуры воздуха и большее количество осадков по сравнению с летними месяцами (рис.9). Однако следует отметить, что также низкими значениями характеризуется эмиссия CO_2 в июле, что возможно связано с высокими для этого месяца уровнями болотных вод, вызванных ливневыми дождями.

Наиболее четко суточная динамика выражена в июне, который характеризуется максимальными значениями эмиссии CO_2 в период среднесуточного максимума (205,9), суточная амплитуда в июне составляет $202 \text{ мгCO}_2/\text{м}^2\text{час}$. Минимальная амплитуда суточного хода наблюдается в сентябре ($51 \text{ мгCO}_2/\text{м}^2\text{час}$), также сентябрь характеризуется самыми низкими значениями эмиссии CO_2 за исследуемый период.

Наибольшие различия в суточном ходе по месяцам наблюдаются в дневное время, тогда как в ночные и утренние часы, значения эмиссии имеют близкие величины. Динамика выделения CO_2 приведена на рис. 10.

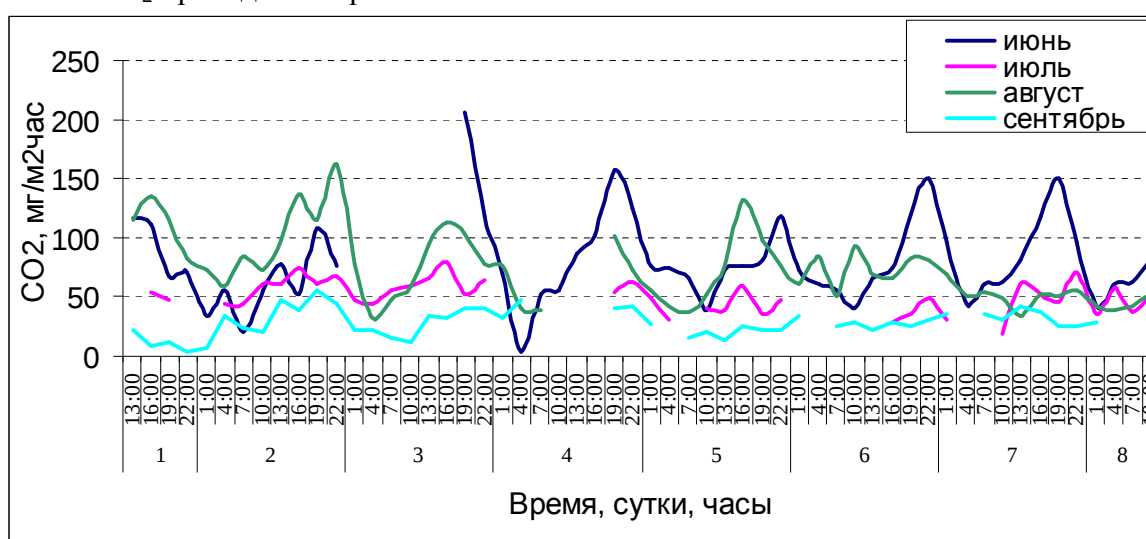


Рис.10. Суточная динамика выделения CO_2 в разные месяцы

Выделение CO_2 с поверхности торфяной залежи определяется 3 основными процессами: дыхание гетеротрофных организмов, жизнедеятельность микроорганизмов и физико-химические процессы протекающие в торфяной залежи. Известно, что за счет микроорганизмов обеспечивается около $2/3$ общего потока CO_2 . Температурный оптимум активной жизнедеятельности микроорганизмов лежит в пределах $20-30^\circ\text{C}$, поэтому при низких температурах наблюдаемых в сентябре динамика выделения CO_2 имеет сглаженный характер без четко выраженных пиков, характерных для июля и августа.

Максимальный средний поток CO_2 наблюдается в июне ($80.4 \text{ мгCO}_2/\text{м}^2\text{час}$), минимальный в сентябре ($27.9 \text{ мгCO}_2/\text{м}^2\text{час}$), также низкими значениями характеризуется июль ($49.9 \text{ мгCO}_2/\text{м}^2\text{час}$), что по-видимому связано с большим количеством осадков и высокими уровнями болотных вод в период измерений, так как согласно метеорологическим данным июль был самым теплым месяцем (таблица 6).

Таблица 6.

Статистические характеристики средних значений эмиссии CO_2 , минимальная и максимальная эмиссия CO_2

	июнь	июль	август	сентябрь	Среднее
Среднее	80.44	49.94	74.20	27.88	59.18
СКО	37.29	13.36	30.01	11.71	33.38
Макс	205.88	80.14	162.45	55.18	205.88
Мин	3.34	18.60	32.72	4.10	3.34

Для выявления факторов, оказывающих влияние на эмиссию CO_2 , проводился корреляционный анализ между эмиссией CO_2 , метеорологическими показателями (температура воздуха, атмосферное давление, относительная и абсолютная влажность воздуха), температурой торфяной залежи. Анализ полученных данных показал зависимость суточного хода эмиссии углекислого газа от температуры воздуха (коэффициент корреляции 0,62) и относительной влажности воздуха ($r=-0,46$), причем, с повышением температуры эмиссия увеличивается, тогда как при повышении влажности – уменьшается. Обратная зависимость эмиссии CO_2 и влажности воздуха по-видимому связана с высокой растворимостью углекислого газа в воде. В то же время наблюдается положительная зависимость эмиссии CO_2 от абсолютной влажности ($r=0,46$). Корреляция с атмосферным давлением отрицательная ($r=-0,46$), то есть понижение давления способствует усилению эмиссии CO_2 (таблица 7).

Таблица 7.

Корреляция эмиссии CO_2 с метеорологическими характеристиками

Месяцы	Атмосферное давление	Температура воздуха		Влажность воздуха	
		на высоте 10м	на высоте 2 м	относительная	абсолютная
Июнь	-0.14	0.66	0.67	-0.77	-0.02
Июль	0.36	0.11	0.12	0.19	0.39
Август	0.07	0.65	0.64	-0.38	0.58
Сентябрь	0.01			-0.18	0.04
Общая	-0.46	0.48	0.46	-0.46	0.46

Полученные нами данные соответствуют данным В.К. Курец с соавт. [20], проводившим исследование на открытых участках олиготрофного болота. Основным фактором, определяющим интенсивность эмиссии CO_2 , является температура деятельного слоя торфа, что соответствует данным полученным ранее [21], с увеличением глубины температура торфяной залежи снижается и также снижаются суточные изменения температуры, следовательно с увеличением глубины снижается влияние температуры на эмиссию CO_2 (таблица 8, рис.11), затем следуют уровень болотных вод, влажность мха, температура воздуха.

Таблица 8.

Корреляция потока CO_2 с температурой торфяной залежи

	Температура торфяной залежи				
	поверхность	2см	5см	10см	15см
Эмиссия CO_2	0.75	0.64	0.58	0.41	0.21

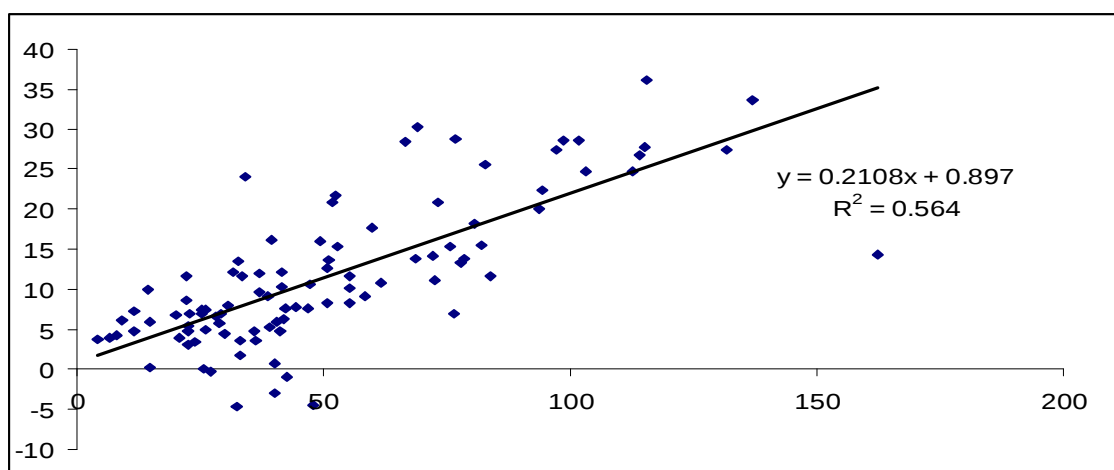


Рисунок 11. Зависимость эмиссии CO_2 от температуры поверхности торфяной залежи.

Содержание углекислого газа в воздухе также имеет суточный ход (рис. 12), однако, в отличие от эмиссии CO_2 , содержание CO_2 в воздухе имеет максимальное значение в 4 утра, а минимальное в 16 часов, то есть наблюдается обратная зависимость эмиссии CO_2 от содержания его в воздухе ($r=-0,74$). Амплитуда колебаний среднесуточных концентрации CO_2 в воздухе составляет 198 ppm.

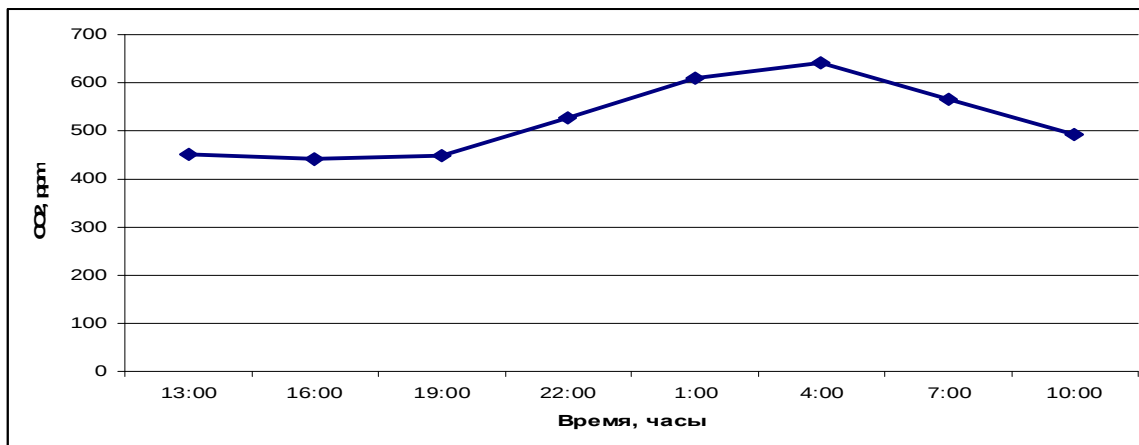


Рис.12. Среднесуточный ход концентрации в воздухе CO_2

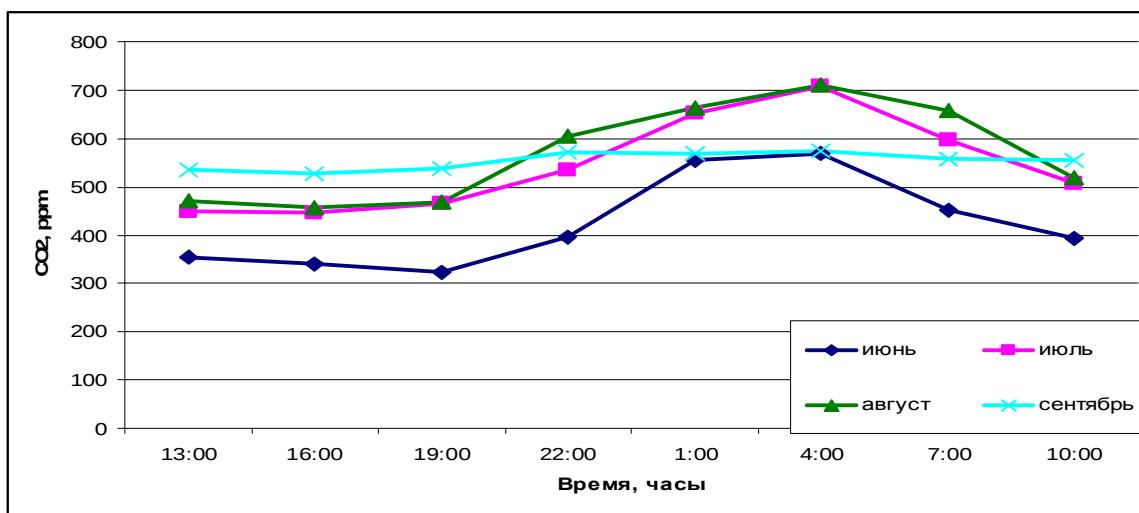


Рис. 13. Среднесуточный ход концентрации CO_2 в воздухе в отдельные месяцы

Суточный ход концентрации CO_2 в воздухе в разные месяцы имеет сходную динамику (рис.13,14, табл. 9), исключение составляет сентябрь, который имеет более сглаженную динамику при достаточно высоких значениях, что объясняется скорее всего низкими температурами воздуха.

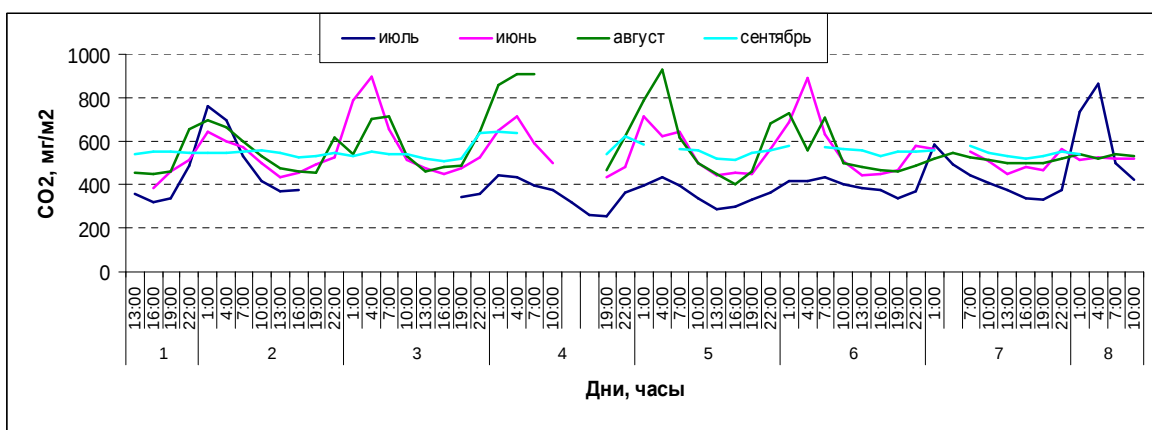


Рис.14. Суточная динамика содержания CO₂ в воздухе

Содержание CO₂ в воздухе определяется главным образом дыханием растений и эмиссией с поверхности торфяной залежи. Дыхание растений наиболее интенсивно происходит в темное время суток, что приводит к увеличению концентрации CO₂ в воздухе в ночное время, тогда как в дневные часы в процессе фотосинтеза происходит поглощение углекислого газа растениями и накопление углерода в виде фитомассы и соответственно происходит снижение содержания углекислого газа в воздухе.

Таблица 9.

Статистические характеристики средних значений содержания CO₂ в воздухе, минимальное и максимальное содержание CO₂ в воздухе

	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Среднее
Среднее	418.5	546.9	571.1	552.7	523.3
СКО	123.5	110.1	129.8	29.9	122.4
Макс	861.0	893.8	931.6	642.8	931.6
Мин	254.7	385.6	402.8	508.5	254.7

Проведенный корреляционный анализ (таблица 10) показал, что содержание CO₂ в воздухе зависит от температуры ($r=-0.81$), атмосферного давления и влажности воздуха ($r=0.47$), при этом в отдельные месяцы зависимость концентрации CO₂ в воздухе от погодных условий меняется, следовательно, невозможно выявить один или два фактора оказывающих однозначное влияние на содержание углекислого газа в воздухе, в зависимости от конкретных условий тот или иной фактор оказывает большее влияние.

Таблица 10.

Корреляция содержания CO₂ в воздухе с метеорологическими характеристиками

Месяцы	Атмосферное давление	Температура воздуха		Влажность воздуха	
		на высоте 10м	на высоте 2 м	относительная	абсолютная
Июнь	0.05	-0.65	-0.77	0.90	-0.17
Июль	0.19	-0.76	-0.84	0.67	-0.45
Август	0.34	-0.57	-0.70	0.82	-0.47
Сентябрь	0.18	-	-	0.15	-0.43
Общая	0.49	-0.60	-0.54	0.47	-0.43

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования можно сделать следующее заключение:

Эмиссия CO₂ с поверхности торфяной залежи имеет четко выраженный суточный ход, с максимумом в 19 часов и минимумом в 7 часов.

Содержание CO₂ в воздухе также имеет суточный ход с максимумом в 4 часа и минимумом в 16 часов, то есть выявлена отрицательная зависимость между эмиссией CO₂ с поверхности торфяной залежи и концентрацией CO₂ в воздухе ($r=-0,74$).

Выявлена связь эмиссии CO₂ с метеопараметрами: температура воздуха, атмосферное давление, влажность воздуха, а также с температурой деятельного слоя торфяной залежи. Влажность торфа, уровень болотных вод, pH и окислительно-восстановительный потенциал не оказывают существенного влияния на эмиссию CO₂.

Наибольшее влияние на поток CO₂ с поверхности торфяной залежи оказывает температура поверхности торфяной залежи и верхнего 10-сантиметрового слоя торфяной залежи (коэффициент корреляции 0,75 и 0,64, соответственно).

С увеличением температуры поверхности торфяной залежи увеличивается поток CO₂, наблюдается простая линейная зависимость: $Y=0,21X+0,9$, $R^2=0,56$

Литература

1. Болин Б. Какое количество CO₂ останется в атмосфере / В кн. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - С.134-196.
2. Титлянова А.А., Наумов А.В. Потери углерода из почв Западной Сибири при их сельско-хозяйственном использовании // Почвоведение, - 1995. - № 11 - С.1357-1362.
3. Crane A.J. Possible effects to frising CO₂ on climate // Plant cell Environ. - 1985. – Vol. 8. - P.371-379.
4. Будыко М.И. Влияние человека на климат. - Л.: Гидрометеиздат, 1972. - 47с.
5. Будыко М.И., Израэль Ю.А., Маккранен М.С., Хелт А.Д. Предстоящие изменения климата. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 272с.
6. Кобак К.И. Углекислота в биосфере. – Л.:ЛТА, 1977. – 47 с.
7. Houghton R.G. et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere // Ecological Monographs, 1983. – V.53, № 3. – P.235-262
8. Кипич У., Минцер И., Кристоферсон Л. Поступление углекислого газа в атмосферу / В кн. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - С.66-134.
9. Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России // Природа, - 1994. - № 7. - С.15-18.
10. Вомперский С.Э. Роль болот в круговороте углерода. В кн. Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование. - М. Наука, 1994. - С.5-37.
11. Bolin B. The greenhouse effect, climatic change and ecosystems: A synthesis of present knowledge // The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. - 1986. - P.2-8.
12. Gorham E. Northern Peatlands: role in carbon cycle and probable responses to climatic warming // Ecol. Applic. 1 (2). - 1991. - P. 182-195.
13. Вомперский С. Э. Цыганова О. П. Ковалев А. Г. Глухова Т. В. Валяева Н. А. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода / Круговорот углерода на территории России. - М., 1999. – С.124-146.
14. Бирюкова О.Н., Орлов Д.С. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // Почвоведение. – 1995. - № 1. - С.21-32.
15. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Мелентьева Н.В. Запасы углерода в экосистемах болот // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Под ред. В.А. Алексеева и Р.А. Бердси. - Красноярск, 1994. - С. 128-139.

16. Титлянова А.А., Булавко Г.И., Кудряшова С.Я., Наумов А.В., Смирнов В.В., Танасиенко А.А. Запасы и потери органического углерода в почвах Сибири // Почвоведение, - 1998. - № 1. - С.51-59.
17. Нейштадт М.И. Возникновение и скорость развития процесса заболачивания / Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири, - М.: Наука, 1977. - С.39-48.
18. Титлянова А.А., Наумов А.В., Кудряшова С.Я., Булавко Г.И. Запасы органического углерода в почвах Сибири, эмиссия парниковых газов и сток CO₂ в почвы Западной Сибири. // Тезисы докладов II съезда общества почвоведов (27-30 июня - 1996, Санкт-Петербург) кн.1, 1996. – С. 221-222.
19. Титлянова А.А. Эмиссия двуокиси углерода и метана в атмосферу, как часть глобального круговорота углерода. // Обозрение прикладной и промышленной математики, - 1994. - Т.1., вып.6. - С.974-987.
20. Курец В.К., Икконен Е.Н., Алм Ю., Таланов А.В., Дроздов С.Н., Силвола Е., Попов Э.Г. Влияние светотемпературного режима и уровня грунтовых вод на CO₂-газообмен открытого участка олиготрофного болота. // Экология, - 1998. - № 1. - С.14-18.
21. Кудяров В.Н. Почвенные источники углекислого газа на территории России / Круговорот углерода на территории России. - М., 1999. - С. 165-202.

INFLUENCE OF WEATHER AND HYDROTHERMAL CONDITIONS ON THE CARBON DIOXIDE EMISSION FROM THE OLIGOTROPHIC BOG SURFACE

Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A.

The results of investigation of diurnal course of carbon dioxide emission and atmospheric concentration are given. Connections between CO₂ emission rate and weather characteristics, such as air temperature, atmospheric pressure, air humidity and temperature of active layer of peat deposit are established.