

## Современные процессы газообмена в сфагновых болотах лесостепной зоны Барабы (Западная Сибирь)

А. В. НАУМОВ

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630099, Новосибирск, ул. Советская, 18  
E-mail: a.naum@ngs.ru

### АННОТАЦИЯ

Изучены особенности формирования эмиссионных потоков углекислого газа и метана в верховых сфагновых болотах лесостепной зоны в связи с ценотической структурой и нарушениями растительного покрова в результате пожара. Проведен анализ причин сравнительно низких скоростей выделения метана в сосново-кустарничково-сфагновых сообществах верховых болот маргинальной зоны. Получены оценки содержания  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в болотных водах.

**Ключевые слова:** лесостепь, верховое болото, эмиссия, парниковые газы, газообмен, Бараба, Западная Сибирь.

Изучение процессов газообмена в наземных экосистемах составляет приоритетное направление в биосферных программах. Накопление парниковых газов в атмосфере, изменение климатической системы нуждаются в научном объяснении и анализе региональных особенностей и глобальных закономерностей. В решении проблемы углеродного баланса биосферы важное место занимают исследования северных болот бореального пояса [1–6]. Болотные экосистемы рассматриваются как глобальный наземный источник метана и накопитель углерода, поступающего из атмосферы. Оптимальные условия для накопления торфа складываются в местах избыточного увлажнения земной поверхности. Однако особого внимания заслуживают болота маргинальной зоны с неустойчивым атмосферным увлажнением.

Так, верховые сфагновые болота лесостепной зоны в настоящее время не имеют дос-

таточных ресурсов для прогрессивного роста. Они не образуют значительных по площади массивов и представлены в ландшафте отдельными островками. Изменение климата, хозяйственная деятельность человека (мелиоративные мероприятия, разработка торфа), а также частые пожары являются факторами риска для уникальных природных объектов.

Верховые торфяники лесостепной зоны интересны в качестве модельных объектов для оценки диапазона изменений основных параметров углеродного цикла (первичная продукция, накопление торфа,  $\text{CO}_2$ -газообмен, минерализация растительных остатков, торфа и др.). Возможно, что неустойчивый характер атмосферного увлажнения способен вызвать глубокие изменения цикличности процессов и развитие явления рецессии. В ходе предварительных маршрутных наблюдений в 2006–2008 гг. оценено общее экологическое состояние верховых сфагновых болот в условиях лесостепи. Обнаружено,

---

Наумов Алексей Владимирович

что многие из этих объектов пройдены пожарами. Это привело к существенным нарушениям растительности болотных комплексов: деградации сфагнового покрова (пятнистость, проективное покрытие менее 3–5 %), разрастанию кустарников и кустарничков [7].

Основная задача данного исследования заключалась в изучении особенностей формирования эмиссионных потоков углекислого газа и метана сфагновых болот лесостепной зоны в связи с ценотической структурой и нарушениями растительного покрова в результате пожара.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в Барабинской лесостепи в 2009 и 2010 гг. Основные наблюдения за потоками углекислого газа и метана выполнены в летний период в конце июня, начале июля и осенью в сентябре, октябре на верховом сфагновом болоте (RB1) площадью около 4 км<sup>2</sup> (55°14' с. ш.; 79°05' в. д.). Болото сформировалось в небольшой впадине округлой формы. Хорошо выражена центральная часть торфяника, возвышающаяся над элементами окружающего ландшафта. Максимальная мощность торфяной залежи составляет 4,5 м. Около 80 % площади болота занято сосново-кустарничково-сфагновым сообществом (СКС, рям). В моховом покрове преобладает *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr. В северо-западной части болота в локальном понижении сформировалось озерцо. Полоса шириной 50–60 м от ряма к озеру занята осоково-сфагновым сообществом (ОС, топь). Болотный комплекс окаймляют осоково-тростниковые и тростниковые высокопродуктивные сообщества.

Для измерения скорости эмиссии углекислого газа и метана использовали экспозиционные камеры объемом 2 и 60 л. Внутренняя циркуляция воздуха обеспечивалась с помощью встроенного вентилятора. Стальные нержавеющие основания камер предварительно заглубляли в верхний слой торфа на 10 см. Во время экспозиции (15–30 мин) камеры накрывали светонепроницаемым чехлом с отражающим слоем из алюминиевой фольги.

Расчет потоков CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> основан на линейной регрессионной модели изменения концентрации газов внутри камеры в ходе экспозиции. Анализ газовых проб выполнен в лабораторных условиях на хроматографе Кристалл 5000. В ходе полевых экспериментов осуществлялась также автоматическая регистрация концентрации углекислого газа, температуры и относительной влажности воздуха внутри камер с помощью газоанализатора Testo-435 (Germany), температуры торфа на глубине 140 см и воздуха в приземном слое у поверхности сфагнома (Т-175). Оценки потоков углекислого газа, полученные с помощью газоанализатора и газового хроматографа, различались незначительно ( $F_{\text{ГА}} = 0,99 \cdot F_{\text{ГХ}}$ ;  $R^2 = 0,86$ ;  $n = 23$ ), что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Для сравнения аналогичные измерения эмиссии CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> выполнены на восстанавливаемом после пожара 10–15-летней давности верховом торфянике (RB2), расположенном в 30 км к северу от RB1. Болотный комплекс овальной формы площадью около 2,5 км<sup>2</sup> сформировался в локальном понижении у подножия гривы. Хорошо выражена ценотическая структура болота с приподнятой центральной частью (рям) и периферией (тростниковые, осоково-тростниковые и вейниковые сообщества). Максимальная глубина торфяной залежи 3,5 м. Растительный покров в центральной части ряма сильно трансформирован. Разреженный древесный ярус состоит из *Pinus sylvestris* L. высотой до 10–12 м и подроста березы *Betula pubescens* Ehrh. Среди кустарничков преобладают *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench., образовавшие густые заросли. Мхи, среди которых обычно представлены *S. fuscum*, *S. angustifolium* (Russ. ex Russ.) C. Jens., *Polytrichum strictum* Brid., покрывают лишь 3–5 % поверхности торфяной залежи. Оба болотных комплекса находятся в одной биоклиматической зоне и сравнительно близко друг от друга. Это обстоятельство позволило исключить из рассмотрения влияние климатических факторов.

Пробы болотной воды с разных глубин отбирали с помощью металлической трубки и шприца. Первая порция воды, заполнившая

трубку, не использовалась. В лабораторных условиях шприц с болотной водой заполняли аргоном до полного объема (20 мл). После установления равновесия газовую фазу анализировали на хроматографе по стандартной методике [8]. Доступ атмосферного воздуха при отборе болотной воды и подготовке проб к анализу исключался благодаря использованию трехходового крана. Уровень болотных вод (УБВ) и глубину отбора проб отсчитывали от поверхности мохового слоя.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурные условия и атмосферные осадки в годы исследований вполне соответствовали показателям, характеризующим погодно-климатические условия территории лесостепной зоны (рис. 1). Годовое количество осадков колебалось от 350 до 390 мм. Среднемесячная температура июля в 2009–2010 гг. составила 17–18 °С. Более теплые и влажные условия складывались в июле 2008 г.

Распределение летних осадков по месяцам в разные годы имеет неустойчивый характер. В 2009 г. с мая по сентябрь выпало 206 мм осадков. Максимальное количество (79 мм) пришлось на июль. За тот же период 2010 г. сумма осадков составила 179 мм, из которых 90 мм выпало в июне. Недостаток атмосферного увлажнения в летне-осенний период способствовал понижению уровня болотной воды в центральной части болотного комплекса RB1 (до 50–60 см) и полному пересыханию его периферийной части, занятой осоково-тростниковым сообществом.

Как показали наблюдения, пирогенный фактор играет ключевую роль в судьбе верховых болот лесостепной зоны (выгорание сфагнома, прекращение накопления торфа, разрастание кустарников и кустарничков, изменение состава древостоя). Нарушение растительного покрова влечет за собой изменение водного режима всего болотного комплекса. Свидетельством частых пожаров (с периодичностью 15–20 лет) являются тонкие прослойки углистых частиц в вертикаль-

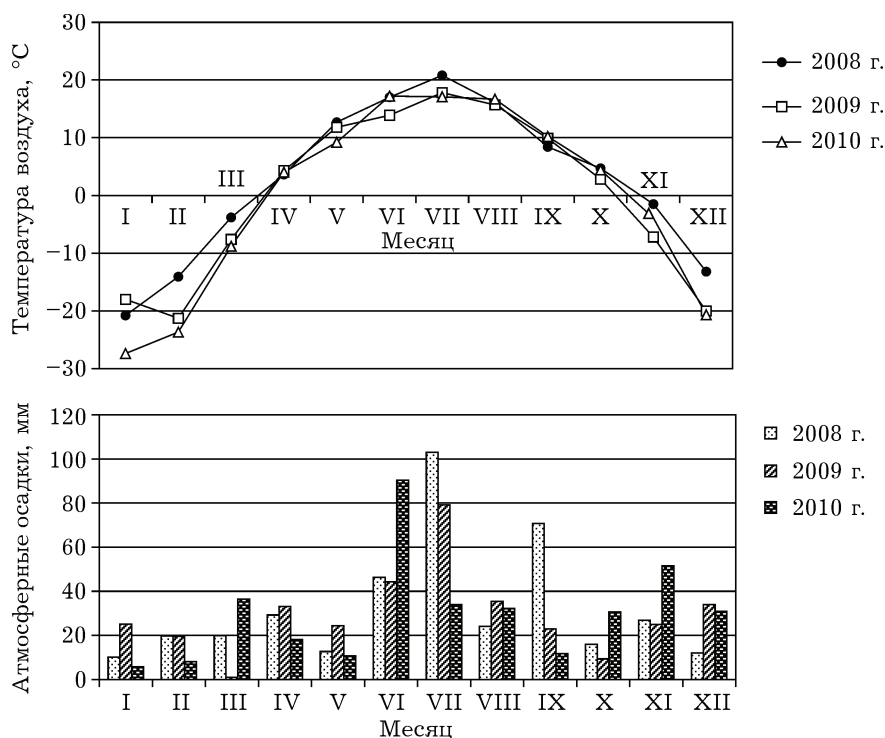


Рис. 1. Температура воздуха и атмосферные осадки в районе исследования. Метеостанция Барабинск (данные предоставлены Web-сайтом “Расписание погоды” <http://rp5.ru/>)

**Эмиссия углекислого газа и метана на контрольном (RB1) и восстанавливающемся после пожара (RB2) верхнем болоте, мг/(м<sup>2</sup> · ч)**

Объект	CO <sub>2</sub> ( $\bar{E} \pm \sigma$ )	CH <sub>4</sub> ( $\bar{E} \pm \sigma$ )	n
RB1	Осоково-сфагновое сообщество (приозерная полоса)		
	142,4 ± 42,5	0,89 ± 0,70	10
	Осоково-тростниковое сообщество (периферия болотного комплекса)		
370,6 ± 210,5	15,67 ± 13,72	11	
RB2	Сосново-кустарничково-сфагновое сообщество (центральная часть)		
	279,0 ± 161,3	0,08 ± 0,12	14
	Тростниково-осоковое сообщество (периферия болотного комплекса)		
620,9 ± 145,1	4,47 ± 2,90	2	
RB2	Сосново-кустарничковое сообщество с пятнами сфагнома (центральная часть)		
	426,5 ± 190,1	0,06 ± 0,06	8

ном срезе торфяника RB2. В таблице приведены средние за весь период наблюдений величины потоков углекислого газа и метана на выбранных объектах. Несмотря на отсутствие сфагнома (проективное покрытие < 3 %), общая эмиссия углекислого газа в центральной части горелого торфяника оказалась несколько выше, чем на ненарушенном болоте. Выделение метана в рямовых сообществах было незначительным. Расположенные на периферии болотных комплексов топяные экосистемы характеризовались более высокой скоростью эмиссии углекислого газа и метана. Промежуточные величины потоков парниковых газов получены для осоково-сфагнового сообщества, сформировавшегося под влиянием внутриболотного озера.

Затрудненное восстановление сфагнового покрова после пожара, очевидно, связано с недостаточным количеством атмосферных осадков в условиях лесостепи. Отсутствие мохового яруса в структуре растительного покрова могло способствовать сдвигу водного баланса болотного комплекса в целом. По крайней мере, при почти одинаковых условиях атмосферного увлажнения уровень болотной воды в периферической части изученных объектов различался на 30–50 см в осенний период 2009 г. Высокая скорость выделения углекислого газа, предельно низкое проективное покрытие сфагнами, отсутствие признаков накопления верхового тор-

фа – результат воздействия пирогенного фактора.

Оценки содержания растворенных газов в болотной воде также выявили разницу между основными типами экосистем болотного комплекса (рис. 2). Концентрация растворенного метана в воде осоково-сфагнового болота, сформировавшегося в лесостепных условиях,

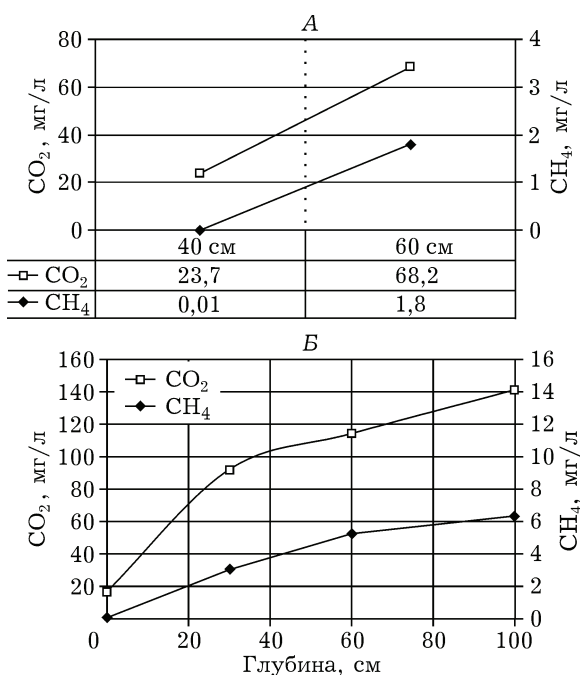


Рис. 2. Содержание растворенных газов в болотной воде сосново-кустарничково-сфагнуовой (А) и осоково-сфагнуовой (Б) экосистем (2.07.2010)

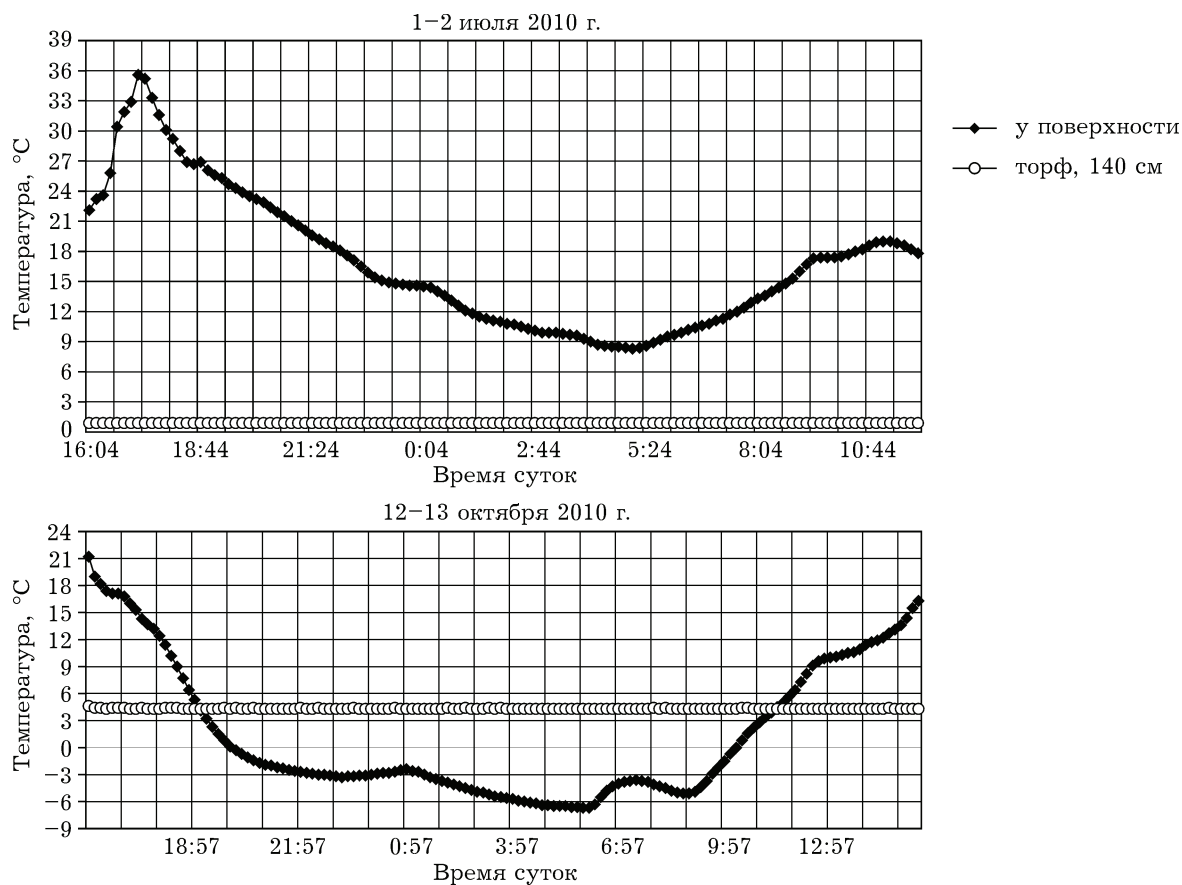


Рис. 3. Температурные условия формирования эмиссионных потоков в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе (вершина яма)

выше, чем в однотипных экосистемах средней и северной тайги [8]. Ее значения 2–6 мг/л больше соответствовали диапазону концентраций, зафиксированных на болотах южной тайги [9–11]. По содержанию растворенного углекислого газа наблюдалась аналогичная тенденция.

Общая закономерность увеличения содержания растворенных  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  с глубиной подтверждается для верхового сфагнового болота лесостепной зоны. Скорость эмиссии метана в атмосферу была более высокой при более высоком уровне его содержания в болотной воде ОС по сравнению с СКС. Расчеты показали, что диффузионный поток метана в жидкой фазе мог составить примерно 30 % от общей эмиссии в атмосферу, зарегистрированной с помощью экспозиционных камер в осоково-сфагновом фитоценозе.

Вместе с этим значительное содержание растворенного углекислого газа и метана в воде центральной части верхового комплексного болота RB1 (СКС фитоценоз) является показателем активности процессов минерализации и метаногенеза в торфяной залежи. Рассмотрим возможные причины низкой скорости эмиссии метана в этой болотной экосистеме. На наш взгляд, основными факторами, оказывающими влияние на выделение метана из торфяной толщи в атмосферу, являются низкие температуры воды и торфа, образование уплотненного слоя, окисление метана микроорганизмами. Несовершенство процедуры установки экспозиционных камер, сложный характер нанорельефа болота, рыхлое сложение верхнего слоя торфяника также вносят долю неопределенности в оценки рассматриваемого показателя.

Несмотря на сравнительно высокую температуру воздуха у поверхности сфагнома (рис. 3), торф на глубине 10–15 см в начале июля прогревался слабо. В зависимости от нанорельефа температура верхнего 10-сантиметрового слоя торфа изменялась в пределах 0,3–4,3 °С. В отдельных местах, локально, встречались льдистые образования. Минимальные суточные температуры воздуха в приземном слое в это время приходится на ранние утренние часы. В глубине торфяной залежи (140 см) суточные колебания температуры практически отсутствуют. В течение теплового периода года температурный режим нижних горизонтов меняется мало. Ранние осенние заморозки на фоне снижения УБВ способствуют проникновению низких температур в зону интенсивного газообмена.

Образование уплотненного горизонта на глубине около 80 см обнаруживалось при бурении верхнего метрового слоя. При достижении глубины 100–120 см наблюдалось бурное выделение болотного газа, обогащенного метаном. Снижение концентрации растворенного  $\text{CH}_4$  до минимального значения 0,01 мг/л на глубине 40 см (при среднем значении УБВ 24 см) может свидетельствовать также о его потреблении микроорганизмами. Таким образом, несовершенство методики в сочетании с особенностями нанорельефа поверхности болота являются основными причинами неопределенности оценок эмиссионных потоков в данном местообитании.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение основных функциональных характеристик верховых сфагновых болот лесостепной зоны актуально в связи с современной динамикой глобальной климатической системы и изменениями окружающей природной среды. Полученные оценки основных параметров  $\text{CO}_2$ - и  $\text{CH}_4$ -газообмена в сравнении с аналогичными характеристиками болотных экосистем таежной зоны позволяют расширить информационную базу. Сведения о современных процессах в торфяных сфагновых болотах могут служить отправ-

ной точкой для организации экологического мониторинга и разработки прогноза динамики лесостепного ландшафта. Утрата этими объектами функции связывания атмосферного  $\text{CO}_2$  и регулирования водно-углеродного баланса территории в результате воздействия пирогенного фактора и хозяйственной активности человека обязывает рассматривать их как структурные элементы ландшафта с повышенным экологическим риском.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вомперский С. Э. Роль болот в круговороте углерода // Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука, 1994. С. 5–37.
2. Ваганов Е. А., Ведрова Э. Ф., Верховец С. В. Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Круглов В. Б., Онучин А. А., Сухинин А. И., Шибистова О. Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сиб. экол. журн. 2005. № 4. С. 631–649.
3. Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol. App.* 1991. Vol. 1, N 1. P. 182–195.
4. Wieder K. R., Yavitt J. B. Peatlands and global climate change: insights from comparative studies of site situated along a latitudinal gradient // *Wetlands*. 1994. Vol. 14. P. 229–238.
5. Naumov A. V. Carbon budget and emission of greenhouse gases in bog ecosystems of Western Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2004. Vol. 37, N 1. P. S58–S64.
6. Clymo R. S., Turunen J., Tolonen K. Carbon accumulation in peatland // *Oikos*. 1998. Vol. 81. P. 368–388.
7. Наумов А. В., Косых Н. П., Паршина Е. К., Артымук С. Ю. Верховые болота лесостепной зоны, их состояние и мониторинг // Сиб. экол. журн. 2009. № 2. С. 251–259. (Naumov A. V., Kosykh N. P., Parshina E. K., Artymuk S. Yu. Raised bogs of the forest-steppe zone, their state and monitoring // *Contemporary Problems of Ecology*. 2009. Vol. 2, N 6. P. 671–677. DOI: 10.1134/S 1995425509060290).
8. Наумов А. В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
9. Наумов А. В., Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. К вопросу об эмиссии углекислого газа и метана из болотных почв Южного Васюганья // Сиб. экол. журн. 1994. № 3. С. 269–274.
10. Ефремова Т. Т., Бажин Н. М., Гаджиев И. М., Ефремов С. П., Махов Г. А. Особенности метаногенеза на олиготрофных болотах Западной Сибири и оценка факторов среды в связи с корректной экстраполя-

- цией потоков  $\text{CH}_4$  на большие территории // Сиб. экол. журн. 1998. № 6. С. 563–570.
11. Inoue G., Takahasi Y., Maksyutov S., Sorokin M., Panikov N. Methane emission rate from the wetland

in West Siberia and its controlling factors // Proc. of the Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1996. Japan, Tsukuba. 1997. P. 34–39.

## **Modern Gas-Exchange Processes in Forest-Steppe Sphagnum Bogs in the Baraba (West Siberia)**

A. V. NAUMOV

*Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS  
630099, Novosibirsk, Sovetskaya str., 18  
E-mail: a.naum@ngs.ru*

Particularities of the shaping emission flows of carbon dioxide and methane in forest-steppe raised Sphagnum bogs were studied in connection with coenotic structure and damage to the vegetation as a result of fire. The reasons of relatively low methane fluxes in pine-dwarf shrub Sphagnum bogs under the marginal conditions were analyzed. The concentrations of  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  in bog waters were presented.

**Key words:** forest-steppe, raised bog, emission, greenhouse gases, gas exchange, Baraba, West Siberia.