

## ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 630\*114

DOI: 10.15372/GIPR20230104

**Л.И. ИНИШЕВА\***, **А.В. ГОЛОВЧЕНКО\*\***, **О.Н. СМИРНОВ\***

\*Томский государственный педагогический университет,  
634061, Томск, ул. Киевская, 60, Россия, inisheva@mail.ru

\*\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, golovchenko.alla@gmail.com

### МОНИТОРИНГ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ БОЛОТ ГОРНОГО АЛТАЯ

*Представлены результаты обследования болот Республики Алтай, проведенного на стационаре с 2010 по 2014 г. На пунктах наблюдения, расположенных на болотах Турочак, Кутюшское и Баланак, исследовались гидротермический, газовый режимы и эмиссия диоксида углерода и метана. Отмечено, что за все годы изучения уровни болотных вод были близки к поверхности, а влажность не опускалась за предел 0,8 полной влагоемкости. Выявлено, что экстремальные значения концентраций  $CO_2$  и  $CH_4$  в мезотрофной залежи изменялись в интервалах 0,05–1,10 и 0–0,62 ммоль/дм<sup>3</sup> соответственно, в эвтрофной залежи эти значения были выше — 0,07–1,40 и 0–0,65 ммоль/дм<sup>3</sup> соответственно. Установлено, что разные погодные условия не являются определяющим фактором динамики газового режима в торфяной залежи эвтрофного и мезотрофного генезиса. Большая роль принадлежит другим, неучтенным факторам. Установлено, что концентрация парниковых газов в торфяных залежах различного генезиса изменялась в небольших пределах, а их динамика в разные по метеоусловиям годы имела неустойчивый режим, но с общим трендом в сторону увеличения к подстилающей породе. Подтверждено, что горные болота не являются значимым источником выделения парниковых газов. Экстремальные потери  $CO_2$  и  $CH_4$  в сумме за летний период составили на болоте Турочак от 29,7 до 76,6 г С/(м<sup>2</sup>-летний период), на болоте Кутюшское — от 42,1 до 80,9 г С/(м<sup>2</sup>-летний период), что в 15–43 раза меньше по сравнению с чистой первичной продукцией.*

**Ключевые слова:** горные болота, Турочакский район, торфяная залежь, газовый режим, парниковые газы.

**L.I. INISHEVA\***, **A.V. GOLOVCHENKO\*\***, **O.N. SMIRNOV\***

\*Tomsk State Pedagogical University,  
634061, Tomsk, ul. Kievskaya, 60, Russia, inisheva@mail.ru

\*\*M.V. Lomonosov Moscow State University,  
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, golovchenko.alla@gmail.com

### MONITORING OF GREENHOUSE GASES IN PEAT DEPOSITS OF SWAMPS IN GORNYI ALTAI

*Presented are the results from surveying the swamps in the Altai Republic at permanent stations from 2010 to 2014. At the observation stations located on the Turochak, Kutuyushskoe and Balanak swamps, the hydrothermal and gas regimes, and also carbon dioxide and methane emissions were investigated. It is pointed out that during all years of investigation the levels of swamp water remained close to the surface, and the humidity did not fall beyond the limit 0.8 of total moisture capacity. It was found that the extreme values of  $CO_2$  and  $CH_4$  concentrations in the mesotrophic peat deposit varied from 0.05–1.10 mmol/dm<sup>3</sup> to 0–0.62 mmol/dm<sup>3</sup>, respectively. In the eutrophic deposit, these values were higher: 0.07–1.40 for  $CO_2$  and 0–0.65 mmol/dm<sup>3</sup> for  $CH_4$ . It is established that different weather conditions are not the determining factor for the dynamics of gas regime in the peat deposit of eutrophic and mesotrophic genesis. A significant role is played by other, neglected factors. It was found that the concentration of greenhouse gases in peat deposits of a different genesis varied within small limits, and their dynamics under differ-*

ent weather conditions had an unstable regime, but with a general increasing trend toward the underlying rock. It was confirmed that mountain swamps are not a significant source of greenhouse gas emissions. Extreme losses of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in total for the summer period were 29.7 to 76.6 g/(m<sup>2</sup>-summer period) on the Turouchak swamp, and 42.1 to 80.9 g/(m<sup>2</sup>-summer period) on the Kutuyushkoe swamp, which is by a factor of 15–43 smaller than the net primary production.

**Keywords:** mountain swamps, Turouchak district, peat deposit, gas regime, greenhouse gases.

За последние 17–18 тыс. лет пул органического углерода в атмосфере увеличился с 625 млрд т (Гт) углерода (18 тыс. л. н.) до 2100 Гт С в настоящее время [1]. В рамках Парижского соглашения по климату Россия взяла на себя обязательства к 2030 г. сократить выбросы парниковых газов до уровня 70–75 % от объема выбросов 1990 г. [2]. В связи с этим оценка пулов и потоков углерода как между компонентами, составляющими биосферу, так и с внешней средой становится сегодня первоочередной задачей экологии. В соблюдении баланса пула углерода в биосфере, несомненно, велика роль экосистем, в том числе и болотных. И объясняется это тем, что болота в биосфере выполняют экосистемные функции, такие как круговорот веществ, биологическое разнообразие, управление рисками климата и др. Болота, например, при образовании торфа связывают больше углерода на единицу площади, чем все другие сухопутные экосистемы, включая лесные. Поэтому несомненный интерес представляет изучение условий образования парниковых газов в торфяных залежах болот и их эмиссии с учетом пространственной вариативности и временной изменчивости, что в условиях Горного Алтая исследовано недостаточно. Цель данной работы — изучение распределения парниковых газов в торфяных залежах разного генезиса и их эмиссии на территории северо-восточной части Горного Алтая.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Стационар Томского государственного педагогического университета «Горный Алтай» располагается на территории, которая по болотному районированию О.Л. Лисс и др. [3] относится к барнаульскому округу лесостепных эвтрофных тростниково-осоково-вейниковых болот (Турочакский административный район Республики Алтай). Объектом исследований являются болота разного генезиса. Болота Горного Алтая развиваются преимущественно в долинах рек и имеют современное происхождение. Процесс болотообразования происходит путем зарастания стариц и долинных озер, но также в результате заболачивания суши, лесов и лугов. На территории стационара было организовано три пункта наблюдений на болотах Турочак (площадь 1,19 км<sup>2</sup>), Кутюшское (0,85 км<sup>2</sup>) и Баланак (1,93 км<sup>2</sup>) (рис. 1).

Современный растительный покров на болоте эвтрофного типа Турочак (52°13'521" с. ш., 87°06'705" в. д.) характеризуется древесно-осоковым фитоценозом. Древесный ярус представлен березой белой (*Betula alba* L.) высотой 8 м, диаметром 10 см, черемухой обыкновенной (*Padus avium* Mill.), встречается сосна обыкновенная (*Pinus silvestris* L.). Подлесок средней густоты образован ивой трехтычинковой (*Salix triandra* L.). Наземный ярус составляют кочки осоки пузырчатой (*Carex vesicaria* L.) высотой до 50 см, в понижениях произрастает хвощ болотный (*Equisetum palustre* L.), папоротник (*Pteridium aquilinum* L.), подбел (*Andromeda*), вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata* L.), росянка круглолистная (*Drosera rotundifolia* L.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), ятрышник шлемоносный (*Orchis militaris* L.), любка двулистная (*Platanthera bifolia* L.), редко подмаренник северный (*Galium boreale* L.), мятлик болотный (*Poa palustris* L.), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* L.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.). Микрорельеф кочковатый — осоково-моховые кочки высотой 0,2 м. Торфяная залежь эвтрофного типа мощностью в среднем 2,5 м при экстремальных значениях от 0,6 до 6 м сложена с поверхности древесно-осоковым торфом (0–150 см) средней степени разложения (20–35 %) и травяным торфом глубже 150 см высокой степени разложения. В основании залежи отмечается горизонт (до 2,5 м) органоминеральных отложений.

Болото Кутюшское (52°18'231" с. ш., 87°15'852" в. д.) является мезотрофным по типу залежи и относится к долинному типу. Растительность на болоте в отдельных его частях различается. Встречаются беслесные пространства, ровные и покрытые сплошным моховым покровом с невысокой осокой. В отдельных местах произрастает береза высотой 2–4 м с редкой сосной и, наоборот, преобладает сосна с редкой березой. В травяном ярусе отмечены пушица (*Eriophorum*), луговик дернистый или щучка (*Deschampsia cespitosa* L.), шейхцерия (*Scheuchzeria palustris*), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), змеевик большой (*Bistorta officinalis* Delarbre), осоки (*C. caespitosa*, *C. vesicaria* L., *C. diandra* Schrank L.). Моховой ярус представлен сфагновыми мхами (*Sph. majus*, *Sph. jensenii*, *Sph. obtusum*, *Sph. magellanicum*). Торфяная залежь болота сложена мезотрофными торфами, которые по видовому

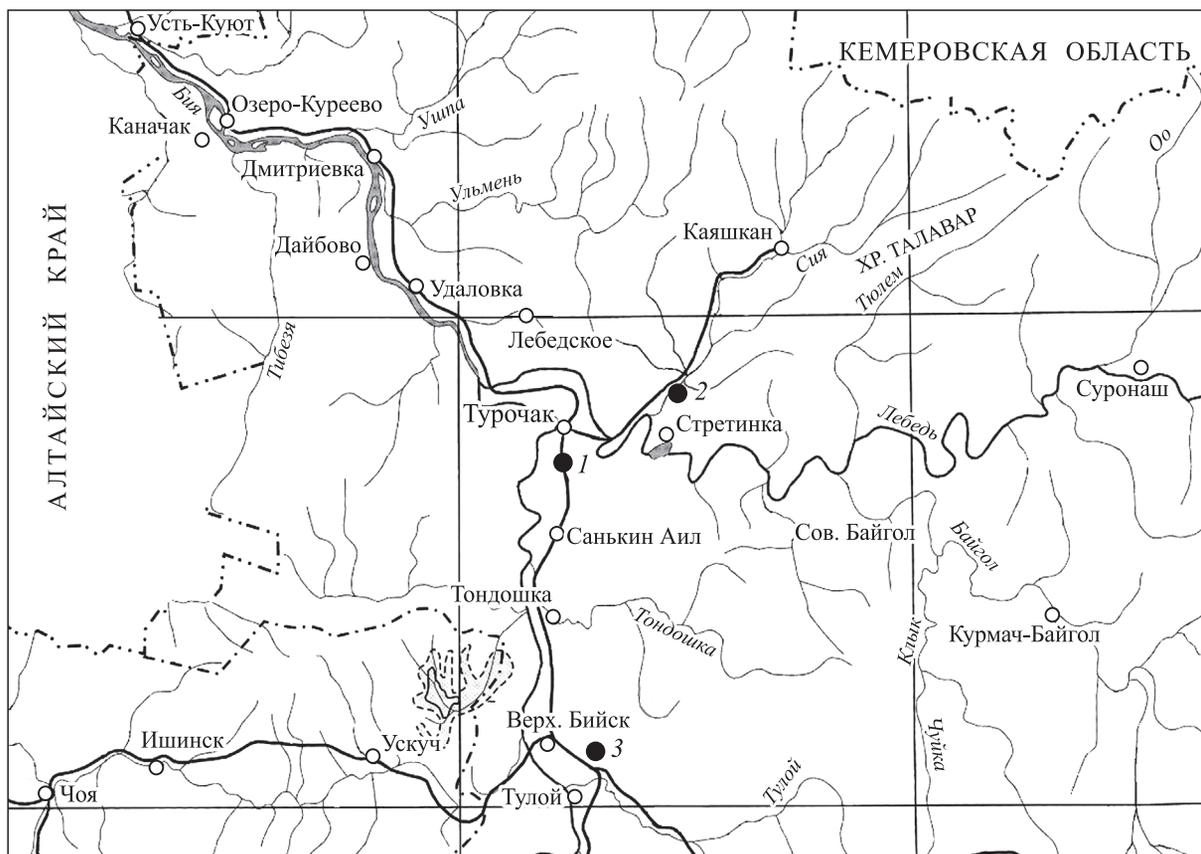


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования.

Болота: 1 — Турочак, 2 — Кутюшское, 3 — Баланак. Черными пунсонами показаны пункты наблюдения, черной линией — автомобильные дороги, черной линией с точками — граница Республики Алтай.

составу представлены (сверху вниз) сфагновым, шейхцериевым, шейхцериево-осоковым видами торфа. Их степень разложения изменяется в широких пределах: от 5 до 40 % (0–15 % в верхней части залежи и 35–40 % с глубины 150 см), зольность — 6–9 %. Средняя мощность торфяных залежей — 1,4 м с экстремальными значениями 0,3–2,1 м.

Третий пункт наблюдений находится на эвтрофном болоте Баланак ( $52^{\circ}18'40''$  с. ш.,  $87^{\circ}15'714''$  в. д.). Биогеоценоз представлен молодыми березами высотой от 3 до 5 м, диаметром 10 см. Микрорельеф кочковатый. В травяном ярусе преобладают хвощ болотный, таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* L.), рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), реже встречаются мятлик, вероника (*Veronica officinalis* L.), вахта трехлистная, мышиный горошек. Залежь сложена с поверхности травяным видом торфа, который вниз по профилю сменяется на древесный и травяной виды. Средняя мощность залежи — 1,5 м, наибольшая — 6 м. Качественные показатели торфа следующие: степень разложения — от 10 до 55 %, значения зольности — 21–26 % с поверхности и 38–50 % глубже 150 см. В основании торфяных залежей — органоминеральные отложения. Подробная характеристика торфов всех пунктов наблюдения приведена в [4].

На всех объектах ежемесячно проводили наблюдения за уровнем болотных вод (УБВ) [5]. За нулевую отметку принимали условную отметку средней поверхности болотного ландшафта, за среднюю поверхность болота — поверхность, соответствующую отметке средней высоты элементов микрорельефа [6], положение уровня определяли как разность отметок репера и зеркала болотных вод. Для изучения водного режима отбирали пробы торфа до глубины УБВ, влажность определяли весовым методом согласно [7, 8]. Исходные данные по метеоусловиям для расчета гидротермического коэффициента были взяты с сайтов [meteocenter.net](http://meteocenter.net) (за 2010–2012 гг.) и [aisori-m.meteo.ru](http://aisori-m.meteo.ru) (за 2013 г.).

Газовый режим в торфяных залежах изучали в болотах Кутюшское и Турочак в трехкратной повторности реерс-методом [9], камеры устанавливали с учетом стратиграфии торфяных залежей.

Приборы для определения концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  были предоставлены отделением геологии факультета точных наук Университета Невшателя (Швейцария). В качестве пробоотборников использовали камеры размером  $30 \times 40$  мм, объемом 30 мл. Мембранный полисульфоновый фильтр накладывали на боковую стенку камеры и фиксировали винтами. Камеру заполняли дистиллированной водой и закрывали ее аналогичным фильтром. Соединенные между собой полыми пластиковыми трубками, камеры опускали на всю глубину торфяной залежи с учетом ее стратиграфии. После уравнивания в залежи газовой фазы систему с камерами через месяц вынимали. Из каждой камеры через полисульфоновый мембранный фильтр производили шприцом забор жидкости, которую переносили в равном объеме (по 5 мл) в три вакутейнера. В них добавлялись 2–3 капли  $\text{HgCl}_2$  для прекращения микробиологической активности. Вакутейнеры помещали в коробку пробками вниз и доставляли в лабораторию. После дегазации (вакутейнеры помещали в термостат при  $50^\circ\text{C}$  и в течение 30 мин периодически встряхивали) отобранный в трех повторностях из каждого вакутейнера (всего получалось девять проб из одного слоя торфяной залежи) газ анализировали с использованием газового хроматографа «Кристалл-5000.1».

Для измерения эмиссии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (замеры проводились в болотах Кутюшское и Турочак, в болоте Баланак — только в 2011 г.) использовали метод статических замкнутых камер. В исследуемых пунктах устанавливали по три камеры. Газовые замеры проводили ежемесячно в теплый период (май, июль, сентябрь) последовательно по пунктам наблюдений в одно и то же время. С целью определения оптимальных сроков для замера эмиссии газов были проведены исследования в течение дня в разные периоды лета. В результате последовательные замеры начинали всегда в 12:00 и заканчивали в 14:30.

Экспозиционную камеру из оргстекла объемом 60,8 л, накрытую колпаком из теплоизоляции с ламинированной отражающей алюминиевой фольгой (тепобол А толщиной 4 мм), на время измерения устанавливали на стальное основание размером  $37 \times 37$  см, которое предварительно заглубляли в торфяную залежь. Герметизация системы достигалась с помощью гидрозатвора (вода заливалась в пазы основания, чтобы место контакта камеры и основания было погружено в воду). В отверстие на верхней поверхности камеры вставляли резиновую пробку с металлической трубкой и надетым на нее резиновым шлангом для отбора проб газа. Циркуляция воздуха в камере осуществлялась с помощью встроенного вентилятора. При каждом измерении производили отбор из всех камер трех проб газа. Отбор газа осуществляли в равноотстоящие периоды времени (общее время экспозиции составило 30–60 мин), и таким образом на каждом пункте отбирали образцы газов в девяти повторностях. Газовый состав анализировали с помощью хроматографа «Кристалл-5000.1». Расчет эмиссии основан на линейной регрессионной модели изменения концентрации газов внутри камеры в ходе экспозиции. Суммарные потоки парниковых газов за летние месяцы рассчитывали с учетом его продолжительности в теплый период года и выражали в  $\text{г С}/(\text{м}^2 \cdot \text{теплый период})$ .

Все лабораторные исследования проводили в аккредитованной лаборатории Томского государственного педагогического университета (ТГПУ) и в Аналитическом центре геохимии природных систем Томского политехнического университета. Статистическая обработка результатов анализа осуществлялась с использованием пакета Microsoft Office 6.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Гидролого-климатические условия периода исследования.** При характеристике погодных условий использовались показатели гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК). Репрезентативность этого показателя при описании погодных условий обоснована в работе М.И. Будыко [10]. Период наблюдений составляет четыре года: сухой год — 2013 (ГТК — 1,07); 2014 г. (1,4) и 2012 г. (1,6) — среднемноголетние; 2010 г. — влажный (2,1) (табл. 1).

Таблица 1

Гидротермический коэффициент по ГМС Турочак

Год	Месяц					Май–сентябрь
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
2010	1,1	1,8	1,6	3,5	2,8	2,1
2011	2,0	1,0	0,9	1,5	1,7	1,4
2012	0,9	1,8	1,5	1,5	2,3	1,6
2013	1,1	0,8	1,3	1,7	0,47	1,1
Среднемноголетние показатели ГТК	0,8	1,73	1,85	1,59	1,47	1,5

За период наблюдений динамика колебаний УБВ на болоте Турочак варьировала в пределах от  $-45$  до  $-10$  см относительно средней поверхности болот, на Кутюшском — от  $-50$  до  $-25$ , на Баланаке — от  $-50$  до  $-15$  см. Погодные условия сухого года оказали влияние на снижение УБВ на болоте Кутюшское. Влажность верхнего полуметрового слоя торфяной залежи в теплые периоды исследуемых лет изменялась в диапазоне  $0,9-1,0$  полной влагоемкости на всех пунктах стационара.

**Концентрация парниковых газов в торфяной залежи.** Концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (определены за три года) в экстремальных значениях при рассмотренных летних условиях изменялись в мезотрофных залежах по  $\text{CO}_2$  в пределах  $0,05-1,10$  ммоль/дм<sup>3</sup> и по  $\text{CH}_4$  —  $0-0,62$  ммоль/дм<sup>3</sup>. Для эвтрофных торфяных залежей эти значения были немного выше: по  $\text{CO}_2$  —  $0,07-1,40$  ммоль/дм<sup>3</sup> и по  $\text{CH}_4$  —  $0-0,65$  ммоль/дм<sup>3</sup>. Если сравнить эти показатели с таковыми для западносибирских болот [11], то можно отметить их близкие значения по концентрации  $\text{CO}_2$  и более высокие концентрации  $\text{CH}_4$  как в мезотрофных, так и в эвтрофных торфяных залежах болот Алтая. Это доказывает, что, несмотря на разные условия протекания болотообразовательного процесса в этих двух регионах, торфяные залежи характеризуются похожим строением и близкими концентрациями парниковых газов. Важно обратить внимание на тот факт, что, согласно [12], основу торфа составляют высокомолекулярные продукты распада и растительные остатки твердых высокополимеров целлюлозной природы, находящихся в контакте с водным раствором низко- и высокомолекулярных веществ. В результате в торфяной залежи образуются системы, трудно проницаемые для молекул воды, в которых сохраняются аэробные условия. Отмеченные особенности оказывают влияние на формирование микробного сообщества и газовый состав в торфяных залежах.

Рассмотрим влияние погодных условий на динамику концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в торфяных залежах болот Турочак и Кутюшское по средним значениям во всей залежи (рис. 2). В торфяной залежи болота Турочак во влажный год концентрация  $\text{CO}_2$  была значительно выше в мае (ГТК — 2). Однако бóльшая концентрация углекислого газа отмечалась в такой же месяц в сухой год, в остальные месяцы в эти годы она была примерно одинаковой, независимо от ГТК месяцев. Вместе с тем в июле

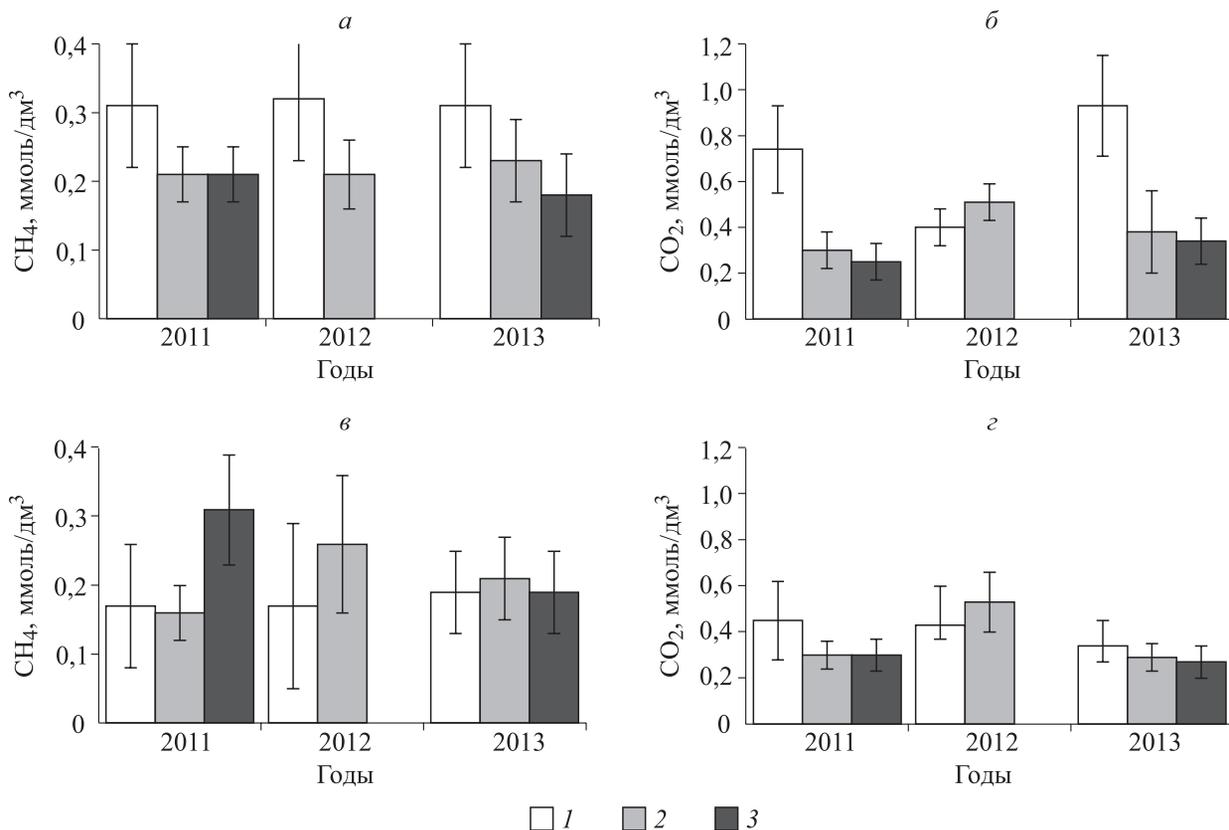


Рис. 2. Динамика концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  (средние значения, ммоль/дм<sup>3</sup>) в торфяных залежах болот Турочак и Кутюшское.

Турочак: а —  $\text{CH}_4$ , б —  $\text{CO}_2$ ; Кутюшское: в —  $\text{CH}_4$ , г —  $\text{CO}_2$ . Месяц: 1 — май, 2 — июль, 3 — сентябрь.

среднемноголетнего 2012 г. концентрация  $\text{CO}_2$  была выше, чем в сухой год. Таким образом, в условиях эвтрофного болота отмечалась слабая связь динамики образования  $\text{CO}_2$  в торфяной залежи с погодными условиями. Тем не менее многие авторы констатируют тот факт, что в сухие периоды процесс трансформации органического вещества торфов активизируется и концентрация этого газа увеличивается [13–16].

В этих же погодных условиях в торфяной залежи мезотрофного болота Кутюшское закономерность по динамике  $\text{CO}_2$ , частично проявившаяся в залежи болота Турочак, не отмечалась. Майские показатели были близки по своим значениям за все годы. В остальные месяцы динамика  $\text{CO}_2$  была аналогична динамике в эвтрофном болоте Турочак, а в сухой год их значения были даже немного ниже. Таким образом, и в мезотрофном болоте связь с погодными условиями, отмечаемая исследователями, например, в минеральных почвах, выражена в слабой степени. Можно предположить, что переувлажненность и особая структура торфяной залежи являются основными факторами для пространственно-временного изменения концентрации парниковых газов в горных эвтрофных и мезотрофных болотах. Имеет место и другое предположение. В период исследований не вошли экстремально влажные и экстремально сухие годы и месяцы, и только август (ГТК — 3,5) и сентябрь (2,8) 2010 г. можно назвать экстремально влажными. Возможно, такие условия обеспечили бы большую зависимость динамики газов в торфяной залежи от погодных условий.

Представляет интерес динамика  $\text{CH}_4$  в торфяных залежах исследуемых болот. В мае во все годы наблюдались самые высокие концентрации  $\text{CH}_4$  в торфяной залежи болота Турочак, а в залежи болота Кутюшское они имели наименьшие значения. Также, вопреки мнению о снижении активности процесса в сухие годы, более высокие значения концентрации  $\text{CH}_4$  проявились в мае относительно сухого года. И только в сентябре 2011 г. (ГТК — 1,7) и июле 2012 г. (1,5) концентрация  $\text{CH}_4$  в торфяной залежи болота Кутюшское была высокой, но не превышающей таковую для болота Турочак. Таким образом, разные погодные условия теплого периода не были определяющим фактором задержки отклика изменения концентрации газов на погодные условия. Это может быть связано также и с задержкой выхода  $\text{CH}_4$  на поверхность, определяемой структурой торфяной залежи, а также с другими, неучтенными факторами.

Указанные процессы находят отражение и в распределении  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  по профилю торфяной залежи. Рассмотрим это положение на примере болота Турочак за два различающихся по погодным условиям года — влажного 2011 г. и относительно сухого 2013 г. (рис. 3). Как следует из рисунка, увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  происходило от поверхности к подстилающим породам и во влажный, и в сухой годы. По максимальным концентрациям  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  резко выделялся май. Отмечалась выраженная вариабельность парниковых газов в торфяных залежах в июле и сентябре. Важно обратить внимание на слой 150 см в залежи, в котором происходило изменение концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в сторону ее последующего снижения. Именно в этом слое отмечаются увеличение зольности и смена ботанического состава торфа шейхцериевого на шейхцериево-осоковый вид. Таким образом, концентрация парниковых газов в торфяной залежи изменялась в небольших пределах, а их динамика в разные по погодным условиям годы и месяцы имела неустойчивый режим, но с общим трендом в сторону увеличения к подстилающей породе. Такая закономерность проявилась и в эвтрофном болоте Турочак, и в мезотрофном Кутюшском. Также отмечалась параллельность изменения в торфяных залежах динамики концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , что противоречит известному положению о большей концентрации  $\text{CO}_2$  в верхнем слое, а  $\text{CH}_4$  — в нижнем [17–19].

Следует отметить, что процессы, протекающие в торфяных залежах болот Горного Алтая, многофакторные. Значительная роль принадлежит ботаническому составу торфов, который определяет активность микробиологических и биохимических процессов в стратиграфическом профиле разных по генезису болот. Однако вопрос выявления механизма совместного влияния всех факторов на образование парниковых газов в торфяных залежах представляет определенную трудность и пока остается открытым.

**Эмиссия парниковых газов и потоки углерода.** Принимая во внимание отмеченные особенности динамики концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  за летние периоды в торфяных залежах исследуемых болот, рассмотрим динамику эмиссии газов (за четыре года) (табл. 2).

Наибольшая эмиссия  $\text{CO}_2$  в эвтрофном болоте Турочак наблюдалась в 2010 г. (ГТК — 2). Интервал ее изменения за этот год был в пределах 64–77,1 мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  при среднем значении 71,6 мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ , что в 1,7–3,7 раза превысило средние значения за другие годы. Соответственно, и суммарный поток углерода в виде  $\text{CO}_2$  был отмечен во влажный 2010 г. (70,8 г С/ $\text{м}^2$ -летний период), в сухой 2013 г. его величина уменьшилась в 2,2 раза — 28,1 г С/ $\text{м}^2$ -летний период).

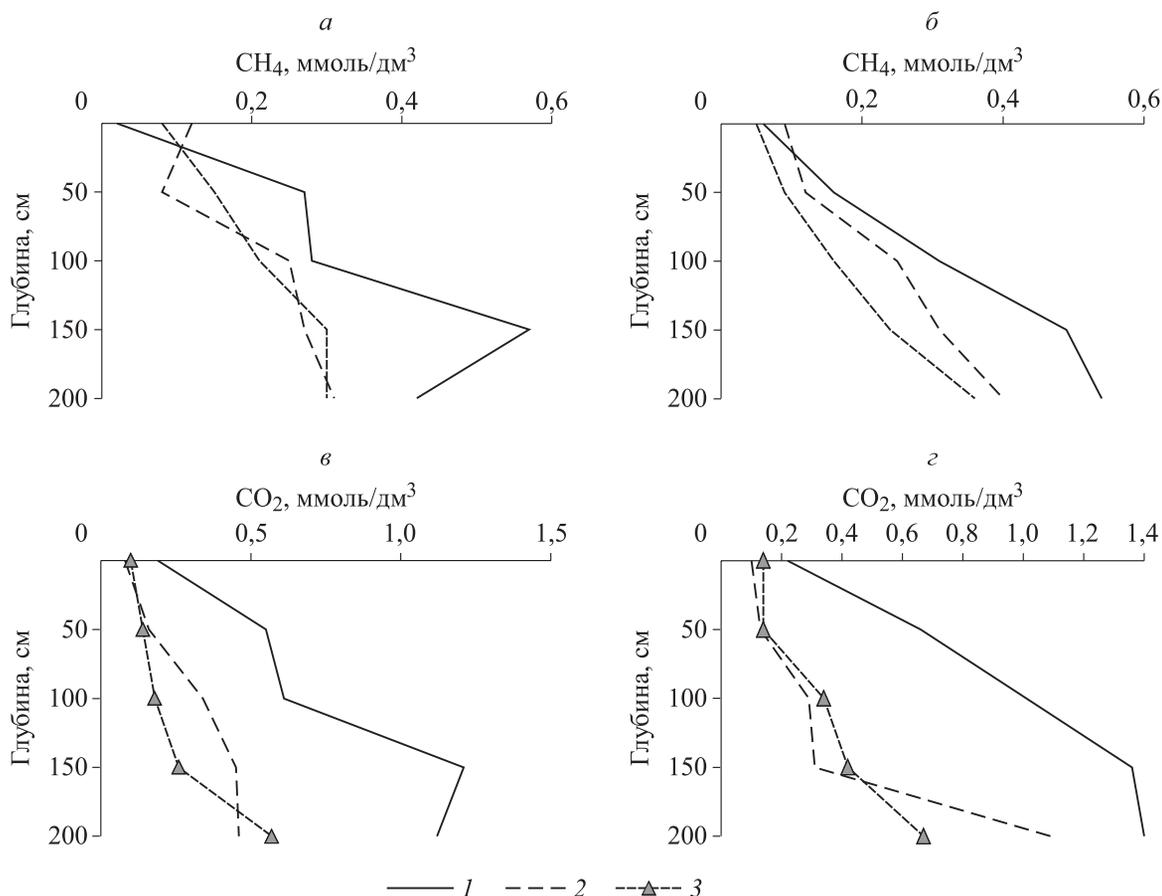


Рис. 3. Профильная динамика концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в торфяной залежи болота Турочак в 2011 г. (а, в) и 2013 г. (б, г), ммоль/дм<sup>3</sup>.

Месяц: 1 — май, 2 — июль, 3 — сентябрь.

Экстремальные значения эмиссии  $\text{CH}_4$  на болоте Турочак характеризовались пределами варьирования от  $-4,1$  до  $11,3$  мг  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  с наибольшей средней эмиссией за теплый период в сухой 2013 г. —  $5,9$  мг  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (см. рис. 2), и только в июле эмиссия  $\text{CH}_4$  отличалась высокими значениями. Во влажные годы этот показатель снижался до  $1,7-4,2$  мг  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Важно также отметить,

Таблица 2

Динамика эмиссии диоксида углерода и метана в болоте Турочак, мг  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

ГТК/год	$\text{CO}_2$					$\text{CH}_4$				
	май	июль	сентябрь	экстремумы среднее	суммарный поток, г С/(м <sup>2</sup> ·лет- ный период)	май	июль	сентябрь	экстремумы среднее	суммарный поток, г С/(м <sup>2</sup> ·лет- ный период)
2,1/2010	73,7	77,1	64,0*	$\frac{64,0-77,1}{71,6 \pm 3,9}$	$70,8 \pm 4,14$	-2,9	6,6	5,7	$\frac{-2,9-6,6}{3,1 \pm 3,0}$	$3,1 \pm 0,47$
1,4/2011	42,7*	26,1	56,1	$\frac{26,1-56,1}{41,6 \pm 8,7}$	$41,2 \pm 2,04$	-4,1	8,0	8,6	$\frac{-4,1-8,6}{4,2 \pm 4,1}$	$4,1 \pm 0,54$
1,6/2012	17,2	49,7	27,0	$\frac{17,2-49,7}{31,3 \pm 9,6}$	$31,0 \pm 1,73$	1,3	-1,6	5,4*	$\frac{-1,6-5,4}{1,7 \pm 2,0^*}$	$1,7 \pm 0,09$
1,1/2013	31,0	27,2	27,0	$\frac{27,0-31,0}{28,4 \pm 1,3}$	$28,1 \pm 0,89$	4,1	11,3	2,2	$\frac{2,2-11,3}{5,9 \pm 2,8}$	$5,8 \pm 1,17$

Примечание. \* — рассчитанные значения; «±» — доверительный интервал.

что на болоте Турочак отмечались отрицательные значения  $\text{CH}_4$  в мае 2010 и 2011 гг., а также в июле 2012 г. Эти годы относились к среднемноголетним или влажным. Например, в эвтрофных болотах Западной Сибири отрицательные значения эмиссии, что означает поглощение газа, наблюдались значительно реже [20]. Суммарный поток метана за летний период варьировал в экстремальных значениях от 1,7 до 5,8 г  $\text{C}/(\text{м}^2\cdot\text{летний период})$ , что свидетельствует о небольших величинах эмиссии  $\text{CH}_4$  в разные годы исследований.

Выше при описании газового режима в торфяной залежи отмечалось, что, кроме погодных условий, на формирование газового состава и в дальнейшем — эмиссии оказывает влияние ботанический состав залежи. В качестве примера рассмотрим динамику  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  за май–сентябрь в среднемноголетний год в эвтрофных болотах Турочак и Баланак (рис. 4). В мае болото Баланак было покрыто водой. Строение торфяных залежей обоих болот аналогичное и соответствует эвтрофному типу, однако есть небольшие различия. Болото Баланак сложено травяным видом торфа с поверхности и до подстилающей породы, но эти слои перемежаются со слоями древесного торфа, видовой состав растений-торфообразователей которых существенно различается. В результате торф болота Баланак характеризуется меньшей степенью разложения и большей зольностью по сравнению с травяным торфом болота Турочак. В июне и июле эмиссия  $\text{CO}_2$  была значительно выше в болоте Баланак, в сентябре — на 30 % ниже. Эмиссия метана в июне, наоборот, в два раза была меньше в болоте Баланак и практически одинаковая в другие месяцы. Отсюда можно сделать вывод, что стратиграфия торфяной залежи и, соответственно, направленность биохимических процессов трансформации торфов существенно влияют на активность эмиссии парниковых газов.

Далее остановимся на динамике эмиссии парниковых газов на мезотрофном болоте Кутюшское. Эмиссия  $\text{CO}_2$  там была выше (в 1,5–2 раза) по сравнению с эмиссией на болоте Турочак, и пределы ее изменения составили от 34,9 до 109,9 мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  с наибольшим значением в среднемноголетний год и наименьшим — в сухой (табл. 3). Во влажные годы значения эмиссии оставались высокими. Корреляционный анализ величины эмиссии  $\text{CO}_2$  в разные годы из болота Кутюшское с динамикой его концентрации в торфяных залежах позволяет предположить, что эти показатели не взаимосвязаны. Отчасти это можно объяснить тем, что газы, образующиеся внутри залежи, могут распространяться в ней в различных направлениях и депонироваться в составе сплошной воздушной фазы, а также в растворенном и адсорбированном виде [12, 20]. Исследования эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности болота Кутюшское показали, что ее средние значения за теплый период колебались в пределах 34,9–109,9 мг  $\text{CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ . Суммарные потоки  $\text{CO}_2$  за все летние периоды по значениям были практически одинаковыми, и только в относительно сухой год поток характеризовался самыми низкими значениями — 41,6 г  $\text{C}/(\text{м}^2\cdot\text{летний период})$ .

В динамике эмиссии  $\text{CH}_4$  на болоте Кутюшское отрицательные значения наблюдались только в июле сухого года, а экстремальные пределы значений составляли  $-1,4\dots-15,1$  мг  $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ . Средние значения эмиссии  $\text{CH}_4$  за теплый период были выше по сравнению с эмиссией на болоте Турочак в среднемноголетний и влажные годы. Суммарные потоки  $\text{CH}_4$  за период исследования изменялись в среднем в пределах от 0,5 до 11,6 г  $\text{C}/(\text{м}^2\cdot\text{летний период})$ .

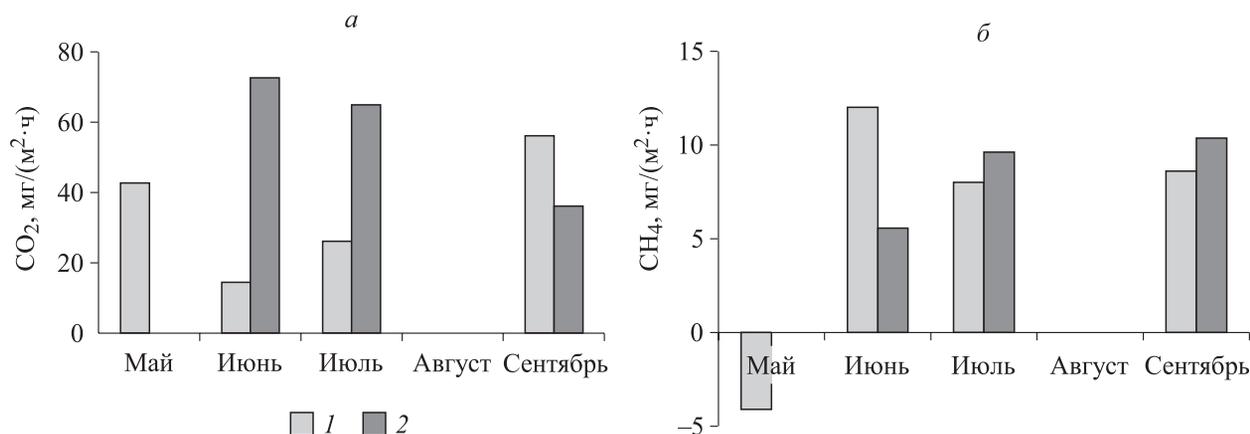


Рис. 4. Динамика эмиссии  $\text{CO}_2$  (а) и  $\text{CH}_4$  (б) в болотах Турочак (1) и Баланак (2) в 2011 г. (в августе значения не определяли).

Динамика эмиссии диоксида углерода и метана в болоте Кутюшское, мг CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup>·ч)

ГТК/год	CO <sub>2</sub>					CH <sub>4</sub>				
	май	июль	сентябрь	экстремумы среднее	суммарный поток, г С/(м <sup>2</sup> -лет- ний период)	май	июль	сентябрь	экстремумы среднее	суммарный поток, г С/(м <sup>2</sup> -лет- ний период)
2,1/2010	37,6	62,5	109,9	37,6–109,9 70,0 ± 21,2	69,3 ± 12,14	0,7	6,4	15,1	0,7–15,1 7,4 ± 4,2	7,3 ± 1,14
1,4/2011	89,6	53,0	49,1	49,1–89,6 63,9 ± 12,9	63,2 ± 7,81	12,3	10,4	12,5	10,4–12,5 11,7 ± 0,7	11,6 ± 2,76
1,6/2012	93,3	74,8	34,9	34,9–93,3 67,7 ± 17,2	66,9 ± 9,43	8,9	0,6	0,5	0,5–8,9 3,3 ± 2,8	3,3 ± 0,67
1,1/2013	45,7	45,4	34,9	34,9–45,7 42,0 ± 3,6	41,6 ± 8,89	1,8	–1,4	1,0	–1,4–1,8 0,5 ± 1,0	0,5 ± 0,02

Таким образом, анализ динамики концентрации парниковых газов и их эмиссии в болотах Горного Алтая показал, что в разные по погодным условиям годы в торфяных залежах формировалась невысокая концентрация газов CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в средних и экстремальных значениях. Проведем ориентировочный подсчет баланса углерода в исследованных болотах. Если сложить значения потоков CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, то экстремальные потери углерода за летний период составили на болоте Турочак от 29,7 до 76,6 г С/(м<sup>2</sup>-летний период), на болоте Кутюшское — от 42,1 до 80,9 г С/(м<sup>2</sup>-летний период). Выносом углерода с болотным стоком можно пренебречь, так как он практически отсутствовал. Также не будем учитывать возможные потери углерода в зимний период. На эмиссию парниковых газов в зимние месяцы приходится не более 3 % от общей годовой эмиссии [21]. Безусловно, эти факторы расхода углерода в условиях Алтая еще предстоит изучить. Согласно [22], чистая первичная продукция в пересчете на углерод широко распространенного на территории Горного Алтая осокового болота составляет 612 ± 68 г С/(м<sup>2</sup>-год). Если сравнить эти данные с величинами потери углерода в виде парниковых газов CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, приведенными выше, то можно сделать предварительный вывод о преобладании в изученных торфяных залежах Горного Алтая процесса депонирования углерода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что разные погодные условия не являются определяющим фактором пространственной вариабельности и временной изменчивости концентрации и эмиссии CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в торфяных залежах Горного Алтая эвтрофного и мезотрофного генезиса. Значительная роль в их динамике принадлежит ботаническому составу и, следовательно, сформированной растительности-торфообразователями структуре торфяных залежей. Это влияет на индивидуальность проявления динамики концентрации парниковых газов в профиле торфяной залежи и в последующем — на эмиссию.

Концентрации парниковых газов торфяных залежей исследованных болот за все годы отмечались следующие: в мезотрофной торфяной залежи по CO<sub>2</sub> — 0,05–1,10 и по CH<sub>4</sub> — 0–0,62 ммоль/дм<sup>3</sup>; в эвтрофной по CO<sub>2</sub> — 0,07–1,40 и по CH<sub>4</sub> — 0–0,65 ммоль/дм<sup>3</sup>.

Эмиссия и поток парниковых газов в экстремальных значениях на мезотрофном болоте по CO<sub>2</sub> составляли 34,9–109,9 мг CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup>·ч) и 41,6–69,3 г С/(м<sup>2</sup>-теплый период), по CH<sub>4</sub> были следующими: –1,4...–15,1 мг CH<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup>·ч) и 0,5–11,6 г С/(м<sup>2</sup>-теплый период) соответственно.

На эвтрофном болоте отмечались следующие экстремальные значения эмиссии и потока: по CO<sub>2</sub> — 17,2–77,1 мг CO<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup>·ч) и 28,1–70,8 г С/(м<sup>2</sup>-теплый период), по CH<sub>4</sub> составляли –4,1...–11,3 мг CH<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup>·ч) и 1,7–5,8 г С/(м<sup>2</sup>-теплый период) соответственно.

В целом можно отметить, что исследованные болота не являются значимым источником выделения парниковых газов. Суммарные экстремальные потери CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> за летний период составили на болоте Турочак от 29,7 до 76,6 г С/(м<sup>2</sup>-летний период), на болоте Кутюшское — от 42,1 до 80,9 г С/(м<sup>2</sup>-летний период). Таким образом, эти потери значительно меньше по сравнению с чистой первичной продукцией горноалтайских болот. Вот почему столь важно сохранить естественное функционирование этих природных экосистем, являющихся значительными резервуарами потенциально мобильного органического углерода на исследуемой территории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Инишева Л.И., Кобак К.И., Турчинович И.Е.** Развитие процесса заболачивания и скорость аккумуляции углерода в болотных экосистемах России // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 60–68.
2. **Резолюция**, принятая Генеральной Ассамблеей ООН 25 сентября 2015 г. [Электронный ресурс]. — [https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/-ares70d1\\_ru.pdf](https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/-ares70d1_ru.pdf) (дата обращения 26.06.2019).
3. **Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.В., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К.** Болотные системы и их природоохранное значение. — Тула: Гриф и Ко, 2001. — 584 с.
4. **Инишева Л.И., Виноградов В.Ю., Голубина О.А., Ларина Г.В., Порохина Е.В., Шинкеева Н.А., Шурова М.В.** Болотные стационары Томского государственного педагогического университета. — Томск: Изд-во Том. пед. ун-та, 2010. — 148 с.
5. **Наставление** гидрометеорологическим станциям и постам / Ред. Н.Н. Федоров. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — Вып. 6. — 384 с.
6. **Методические указания** по расчетам стока с неосушенных и осушенных болот / Мин. природ. ресурсов и экологии РФ; Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. — СПб.: Петербургский модный базар, 2011. — 150 с.
7. **ГОСТ 11305–83.** Торф. Методы определения влажности. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 10 с.
8. **Технический анализ торфа** / Под общ. ред. Е.Т. Базина. — М.: Недра, 1992. — 358 с.
9. **Steinmann Ph., Shotyk W.** Sampling anoxic pore water in peatlands using «peepers» for *in situ*-filtration // Fresenius Journ. of Analytical Chemistry. — 1996. — P. 709–713.
10. **Будыко М.И.** Изменения климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 280 с.
11. **Инишева Л.И.** Закономерности функционирования болотных экосистем в условиях воздействия природных и антропогенных факторов. — Томск: Изд-во Том. пед. ун-та, 2020. — 482 с.
12. **Лиштван И.И., Король Н.Т.** Основные свойства торфа и методы их определения. — Минск: Наука и техника, 1975. — 320 с.
13. **Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолдчиков Д.Г., Гитарский М.Л.** Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO<sub>2</sub> из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. — 2014. — № 4. — С. 56–66.
14. **Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меняйло О.В., Верховец С.В., Тычков И.И., Урбан А.В., Рубцов А.В., Кошурикова Н.Н., Ваганов Е.А.** Влияние климатических факторов на эмиссию CO<sub>2</sub> из почв в среднетаежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // Экология. — 2020. — № 1. — С. 51–61.
15. **Chen S., Huang Y., Zou J., Shen Q., Hu Z., Qin Y., Chen H., Pan G.** Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties // Agricultural and Forest Meteorology. — 2010. — Vol. 150. — P. 590–605.
16. **Martin J.G., Bolstad P.V.** Variation of soil respiration at three spatial scales: Components within measurements, *intra-site* variation and patterns on the landscape // Soil Biology and Biochemistry. — 2009. — Vol. 41. — P. 530–543.
17. **Nilsson M., Bohlin E.** Methane and carbon dioxide concentrations in bogs and fens with special reference to the effects of the botanical composition // Peat Journ. of Ecology. — 1993. — Vol. 81 (4). — P. 615–625.
18. **Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P.** The role of peatlands in climate regulation Peatland Restoration and Ecosystem Services // Science, Policy and Practice. — Cambridge: Cambridge University Press, 2016. — P. 66–79.
19. **Naumov A.V.** Emission of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in connection with temperature conditions of peat bog soils in the northern taiga subzone // West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present: Proceedings of the VI Intern. Field Symposium (Khanty-Mansiysk, June 28–July 08, 2001). — Tomsk: Tomsk University Press, 2001. — P. 110–113.
20. **Смагин А.В.** Почвенно-гидрофизическое обеспечение исследований газовой функции западносибирских болот в связи с проблемой парникового эффекта // Экол. вестн. Сев. Кавказа. — 2007. — Т. 3, № 3. — С. 46–58.
21. **Шнырев Н.А.** Режимные наблюдения и оценка газообмена на границе почвы и атмосферы (на примере потоков метана стационара среднетаежной зоны Западной Сибири «Мухрино»): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М., 2016. — 26 с.
22. **Волкова И.И., Волков И.В., Косых Н.П., Мироньчева-Токарева Н.П., Кирпотина Л.В., Земцов В.А., Колмакова М.В., Кураев А.В., Захарова Е.А., Кирпотин С.Н.** Горная озерно-болотная система урочища Ештыкель (Горный Алтай) // Вестн. Том. ун-та. Сер. Биология. — 2010. — № 1 (9). — С. 118–137.

*Поступила в редакцию 18.06.2021*

*После доработки 21.07.2022*

*Принята к печати 01.11.2022*