

## Биохимические процессы и газовый режим болот разного генезиса

Л. И. ИНИШЕВА<sup>1</sup>, А. В. ГОЛОВЧЕНКО<sup>2</sup>, М. А. СЕРГЕЕВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный педагогический университет  
634061, Томск, ул. Киевская, 60  
E-mail: inisheva@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
119991, Москва, Ленинские горы, 1  
E-mail: agroecol@yandex.ru

Статья поступила 16.03.2014

Принята к печати 19.01.2015

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты изучения биохимических процессов формирования газового режима в олиготрофной и эвтрофной торфяных залежах болот Западной Сибири в вегетационные периоды 2011–2013 гг. Показано, что динамика образования CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в торфяной залежи контролируется активностью микрофлоры. Получены корреляционные связи эмиссии CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> и газового режима в торфяных залежах. Определены особенности протекания биохимических процессов в олиготрофной и эвтрофной торфяных залежах.

**Ключевые слова:** торфяные болота, Западная Сибирь, трансформация органического вещества, диоксид углерода, метан, микрофлора, газовый режим, эмиссия.

Как отмечают некоторые ученые [Bridges, Batjes, 1996; Васильев, 2000], “антипарниковая” функция болот выглядит весьма скромно – в мировом масштабе они компенсируют всего 0,8–2,6 % углерода техногенных источников и 1,8–5 % глобального прироста CO<sub>2</sub> в атмосфере. Для России эти показатели составляют соответственно 0,3 и 0,6 %, поэтому значение болотных экосистем заключается в запасах углерода, которые накапливаются на протяжении веков в составе торфяной залежи [Tolonen et al., 1993; Вомперский и др., 1999; Vitt et al., 2000; Шар-

ман, 2008]. Вот почему столь важно сохранить естественное функционирование торфяных экосистем, являющихся значительными резервуарами потенциально мобильного органического углерода на планете.

Вместе с тем количественные аспекты динамики газового состава в торфяных залежах как следствие протекающих в них биохимических процессов остаются мало исследованными, несмотря на большое значение болот в проблеме круговорота углерода в биосфере. Поэтому изучение динамики газового режима торфяных залежей болот на протя-

жении длительного времени в разных климатических условиях с одновременным контролем по биохимическим процессам всегда актуально, так как позволяет прогнозировать состояние и развитие болотообразовательного процесса.

Цель исследований – изучение биохимических процессов формирования динамики газового режима в олиготрофной и эвтрофной торфяных залежах болот.

Рассмотрим эти процессы на разных по генезису торфяных болотах: олиготрофном (Васюганье, пункт 3 (п. 3)) и эвтрофном (Таган, пункт 1 (п. 1)).

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Олиготрофное болото “Васюганье” расположено на северо-восточных отрогах Васюганского болота в пределах южно-таежной подзоны Томской обл. По болотному районированию [Лисс и др., 2001] территория относится к бакчарскому южно-таежному округу олиготрофных грядово-мочажинных и сосново-кустарничково-сфагновых болот. На болоте исследования проводились на пункте 3 (п. 3) с координатами 56°58′ с. ш., 82°36′ в. д. Растительность пункта исследования относится к сосново-кустарничково-сфагновой ассоциации с низкой сосной. Угнетенный древесный ярус представлен *Pinus silvestris* f. *Litwinowii*. Средняя высота древостоя – 2–3 м, средний диаметр стволов 3 см. Покрытие древесного яруса – 30 %. Кустарничковый ярус развит обильно на повышениях, общее проективное покрытие – 60–70 %. Ярус сложен *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L. и *Vaccinium uliginosum* L. На вершинах кочек растёт клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus* Turcz.). Травяной ярус имеет проективное покрытие менее 5 % и представлен куртинами *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L. и *Drosera rotundifolia* L. В мховом покрове на повышениях доминирует *Sphagnum fuscum* Klinggr. (95 %), кроме того, на межкочковых понижениях встречаются *Sph. angustifolium* C. Jens. и *Sph. magellanicum* Brid.

Торфяная залежь достигает мощности 3 м и имеет смешанный топяной вид строения. В

пункте исследования 3 с поверхности верховой торф представлен двумя видами – слабой степени разложения фузкум (40 % участия) и средней степени разложения магелланикум (10 % участия), мощностью 1,5 м (табл. 1).

Далее располагается слой торфа переходного типа, отложенный когда-то существовавшими здесь мезотрофными растительными сообществами – древесно-осоковым и древесно-сфагновым, мощностью 0,4 м, который сменяется слоем осокового низинного торфа (40–50 %). В основании торфяной залежи находится слой мощностью 30 см (10 % участия) папоротникового низинного торфа высокой степени разложения (50 %). Подстилающие породы представлены сильно илистой темно-серой гумусированной глиной, иногда содержащей раковины пресноводных моллюсков.

Эвтрофное болото “Таган” площадью 4068 га располагается в 11 км на юго-запад от г. Томска в пределах северо-барабинского округа подтаежных эвтрофных осоково-гипновых болот. Растительность торфяного месторождения в настоящее время переживает в основном эвтрофную фазу развития и представлена древесно-осоковым, осоковым, осоково-сфагновым и травяно-кустарничковыми фитоценозами. На этой территории отмечается активный линейный прирост торфяных отложений со средней скоростью 1,1 мм/год, что обусловлено высокой биологической продуктивностью, характерной для болотных комплексов травяно-гипнового типа. Болото расположено в древней ложбине стока р. Томи, подстилающими породами служат пески и супеси. На болоте исследования проводились на пункте 1 с координатами 56°21′ с. ш., 84°47′ в. д.; растительность представлена березой, редкими угнетенными соснами; наземный покров – крапива, осока, папоротник. Верхний слой составлен древесным низинным (0–25 см) и травяным низинным (25–50 см) торфом, далее следуют древесно-травянистые низинные торфа (50–175 см), частично определенные как вахтовые (50–100 см). Торфяная залежь заканчивается слоем древесного и травяного торфа (175–275 см). В основании залежи располагается заиленный песок черного цвета. Возраст торфяной залежи –  $3445 \pm 50$  лет.

Т а б л и ц а 1  
Характеристика торфяных залежей

Вид торфа, тип залежи	Ботанический состав, %	Глубина, см	R, %	A, % мас.	pH	N <sub>общ</sub> , % с.т.
Васюган						
Фускум торф, В	<i>Sph. Fuscum</i> , 90; <i>Sph. Magellanicum</i> , 10	0–50	5	2,7	2,4	1,1
Медиум торф, В	<i>Sph. Magellanicum</i> , 45; <i>Sph. Angustifolium</i> , 25; <i>Sph. Fuscum</i> , 25; <i>Eriophorum</i> , 5	50–100	5	2,1	2,7	0,8
Медиум торф, В	<i>Sph. Magellanicum</i> , 70; <i>Sph. Angustifolium</i> , 15; <i>Sph. Fuscum</i> , 10; <i>Eriophorum</i> , 5	100–150	10	2,3	2,8	1,4
Сосново-пушице- во-сфагновый, П	<i>Eriophorum</i> , 30; <i>Pinus</i> , 25; <i>Sph. Magellanicum</i> , 15; Кустарнички, 10; <i>Sph. Angustifolium</i> , 10; <i>Sph. Fuscum</i> , 10	150–200	55	6,0	3,7	2,2
Осоковый, Н	<i>C. Lasiocarpa</i> , 35; <i>Drepanocladus sendtneri</i> , 15; <i>Eriophorum</i> , 10; <i>C. Rostrata</i> , 10; <i>Menyanthes trifoliata</i> , 10; <i>Sph. Centrale</i> , 10; <i>Drepanocladus aduncus</i> , 5; <i>Polypodiophyta</i> sp., 5	200–250	45	4,3	4,2	2,0
Осоково-папоротниковый, Н	<i>Polypodiophyta</i> sp., 35; <i>C. Lasiocarpa</i> , 20; <i>Sph. Centrale</i> , 10; <i>Drepanocladus sendtneri</i> , 10; Древесина, 5; <i>C. Rostrata</i> , 5; <i>Menyanthes trifoliata</i> , 5; <i>Sph. Riparium</i> , 5; <i>Carex</i> sp., 5	250–300	45	10,1	4,5	2,2
Таган						
Травяной, Н	Древесина, 15; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 5; <i>C. rostrata</i> , 10; <i>C. cespitosa</i> , 5; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 55; <i>Equisetum</i> sp., 5; <i>Drepanocladus sendtheri</i> , 5	0–50	35	11,2	5,8	1,8
Травяно-гипно- вый, Н	Древесина, 10; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 5; <i>C. rostrata</i> , 10; <i>C. limosa</i> , 10; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 20; <i>Meesia triquetra</i> , 10; <i>Drepanocladus sendtheri</i> , 25; <i>C. cespitosa (omskiana)</i> , 5; <i>Scheuchzeria palustris</i> L., 5	50–75	30	11,2	5,6	–
Травяной, Н	Древесина, 5; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 10; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>C. limosa</i> , 15; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 40; <i>Polypodiophyta</i> sp., 5; <i>Meesia triquetra</i> , 5; <i>Drepanocladus sendtheri</i> , 10; <i>C. cespitosa (omskiana)</i> , 5	75–125	30	6,6	5,6	2,0
Древесно-травяной, Н	Древесина, 20; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 50; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 20; <i>Polypodiophyta</i> sp., 5	150–175	35	10,5	5,8	–
Осоковый, Н	Древесина, 10; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 70; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 10; <i>Polypodiophyta</i> sp., 5	175–200	40	12,1	6,0	2,2
Древесный, Н	Древесина, 75; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 15; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 5; <i>Polypodiophyta</i> sp., 5	200–225	40	10,7	6,1	–
Папоротниковый, Н	Древесина, 10; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 10; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 10; <i>Polypodiophyta</i> sp., 70	225–250	45	10,3	6,2	–
Травяной, Н	Древесина, 15; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 45; <i>Equisetum</i> sp., 5; <i>Polypodiophyta</i> sp., 15; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 20	250–275	40	8,9	6,1	–
Древесно-травяной, Н	Древесина, 30; <i>Carecs lasiocarpa</i> , 5; <i>Menyanthes trifoliata</i> L., 10; <i>Polypodiophyta</i> sp., 55	275–300	55	17,2	6,1	–

П р и м е ч а н и е. R – степень разложения, A – зольность; вид торфа: В – верховой, П – переходный, Н – низинный, с. т. – сухой торф. Прочерк – показатель не определяли.

С мая по сентябрь проводились наблюдения за уровнем болотных вод (УБВ) и температурой стационарно заложенными в торфяную залежь датчиками. В этом же пункте закладывались штанги для определения газового режима “peepers”-методом [Steinmann, Shotyk, 1996]. Эмиссию  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  измеряли камерно-статическим методом, анализ газового состава проводился на газовом хроматографе “Кристалл-5000.2”. Датирование торфяных залежей выполнено на радиоуглеродной установке QUANTULUS-1220 в институте геологии СО РАН.

Методом посева проводилось определение численности аммонификаторов и амилोलитиков. Биомассу микроорганизмов определяли прямым методом с использованием люминесцентной микроскопии в шестикратной повторности. Препараты просматривали на люминесцентном микроскопе МИКМЕД-2 [Методы..., 1991]. Все лабораторные исследования проводились в Испытательной лаборатории (№ РОСС RU.0001.516054). Статистическая обработка результатов анализа осуществлялась в пакете Microsoft Office Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего обратим внимание на то, что трехметровая залежь олиготрофного болота сложена снизу вверх: в основании – слой низинного папоротникового торфа, затем низинный осоковый (1 м) и тонкая прослойка переходного древесно-сфагнового, которые перекрываются мощным слоем (1,5 м) верхового торфа двух видов – магелланикум и фускум (см. табл. 1). В то же время торфяная залежь болота Таган равномерно сложена травяным видом торфа со степенью разложения 25–35 % (см. табл. 1).

Ботаническая принадлежность торфа оказывает существенное влияние на состав органического вещества (ОВ) торфов. Так, в верхнем слое торфяной залежи п. 3 Васюганья, представленной верховыми торфами, преобладают воднорастворимые 0,3–0,4 % мас. на ОВ, легкогидролизуемые соединения 16,6–33,5 % мас. и липиды 0,6–2,6 % мас. Появление в ботаническом составе исследуемого верхового торфа пушицы способствует увеличению содержания гуминовых кислот (ГК) в со-

ставе их ОВ. В торфяной залежи в слое 200–300 см (низинный тип) содержание водорастворимых соединений снижается до 0,1 % мас., при этом содержание лигнина в этом слое увеличивается до 40,8 % мас. на ОВ.

Большое значение имеет и глубина торфяной залежи, так как процесс торфогенеза протекает в разных условиях в деятельном и инертном горизонтах. Так, если провести сравнительный анализ состава ОВ деятельного и инертного слоев, то прежде всего заметно отличие по содержанию ГК легко- и трудногидролизуемых веществ. Процесс гумификации наиболее выражен в нижней части торфяной залежи, а по типам – в низинных болотах. В инертном слое процессы трансформации ОВ протекают в условиях господства восстановительных условий при относительно стабильных температуре и влажности. В этих условиях степень доступности ОВ торфа для биохимического разложения существенно снижается. Направленность трансформации ОВ торфов характеризуется скоростью выделения  $\text{CO}_2$ , что определяет химической природой торфов. Рассмотрим это на примере нескольких видов торфов верхового и низинного типов, содержащихся в исследуемых торфяных залежах (рис. 1).

Так, высокую скорость минерализации имеет комплексный торф, в составе которого преобладают сфагновые мхи: магелланикум, ангустифолиум, фускум (>70 %). Скорость минерализации шейхцериевого торфа, относящегося к травяной группе, вообще невелика. Наибольшей скоростью минерализации характеризуется сфагновый мочажинный торф, в составе которого до 55 % занимают мочажинные растения: шейхцерия, осока топяная, сф. балтикум и другие виды сфагновых мхов. В результате ранее проведенных исследований [Инишева, Дементьева, 1998] определено, что по величине накопления  $\text{CO}_2$  в процессе минерализации верховые торфа располагаются в ряд: сфагновомочажинный > комплексный > фускум > пушицево-сфагновый > шейхцериевый > пушицевый; торфа низинного типа распределяются следующим образом: гипновый > осоковый > осоково-гипновый > вахтовый > древесный > древесно-осоковый.

Таким образом, химический состав торфов в торфяной залежи эвтрофного болота Та-

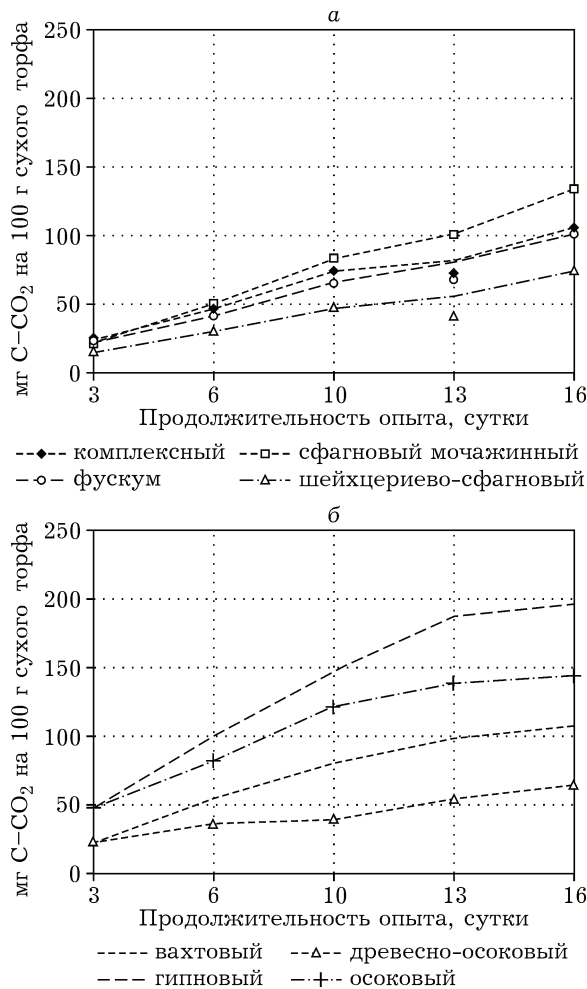


Рис. 1. Кривые кумулятивного потока С-СО<sub>2</sub> при минерализации торфов разного ботанического состава: а – верхового и б – низинного типа

ган, несмотря на довольно равномерную сменяемость торфов по ботаническому составу, различается. В то же время торфяная залежь олиготрофного болота достаточно разнообразна по ботаническому составу как на видовом, так и на типовом уровне, что и определяет степень доступности их для микрофлоры.

Ранними работами в области микробиологии торфа и торфяных залежей [Бегак, Беликова, 1934; Курбатова-Беликова, 1960; Шинкарева, 1960; Зименко, 1983] установлен максимум микробиологической активности и биомассы микроорганизмов только в верхнем слое торфяной залежи. Дальнейшие исследования [Полянская и др., 1999; Головченко и др., 2002; Панкратов и др., 2005] выявили высокую численность микроорганизмов по всей торфяной залежи болот как низинного, так и верхового типа. Так, изучение показателей обилия микроорганизмов в торфяниках с учетом пространственного фактора показало, что вертикальная вариабельность значительно превышает горизонтальную, т. е. численность микроорганизмов в большей степени варьирует по профилю, чем изменяется по горизонтальной структуре болотного БГЦ (табл. 2).

Динамика показателей обилия микроорганизмов выявлена по всему профилю олиготрофного и эвтрофного болот. Бактерии и споры грибов обнаруживали по всему профилю торфяных болот, вплоть до подстиляющей породы, грибной и актиномицетный мице-

Т а б л и ц а 2

Оценка силы влияния факторов на численность различных групп микроорганизмов

Группы микроорганизмов	Торфяники					
	низинные			верховые		
	фактор					
	1	2	3	1	2	3
Грибной мицелий	11,03	–	32,10	29,76	6,84	410,71
Споры грибов	7,96	6,91	28,63	13,67	–	85,54
Бактерии	37,82	88,79	616,52	28,74	3,11	95,29
Актиномицетный мицелий	6,34	–	14,83	13,45	–	17,69

П р и м е ч а н и е. Факторы: 1 – режим эксплуатации (неосушенные и осушенные торфяники); 2 – пространственный фактор (горизонтальная вариабельность); 3 – глубина залегания торфа (вертикальная вариабельность). Численное значение – критерий Фишера при уровне значимости <0,001; прочерк – влияние фактора не достоверно.

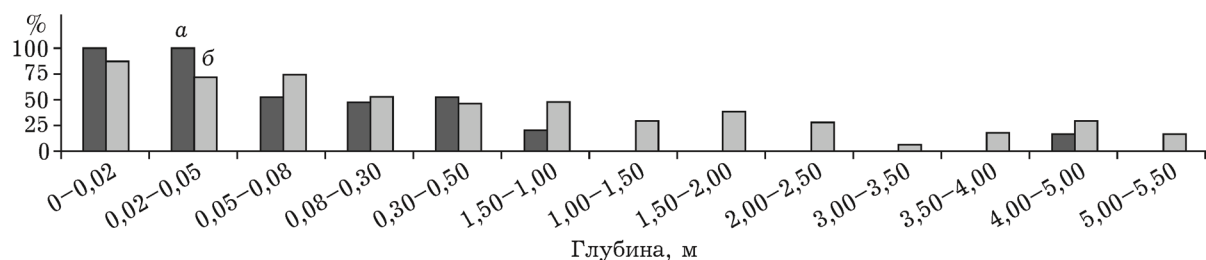


Рис. 2. Прорастание грибных гиф (а) и спор (б) на разных глубинах торфяной залежи олиготрофного типа

лий – на выборочных глубинах торфяной залежи болот обоих типов. Для бактерий выявлена тенденция равномерного распределения или плавного уменьшения численности вниз по профилю торфяной залежи. Плотность грибных спор и дрожжеподобных клеток мало менялась по профилю, но иногда оказывалась выше в более глубоких слоях торфяной залежи, чем в активном слое. Грибной мицелий находили преимущественно в активном слое залежи.

В течение вегетационного периода показатели обилия могли различаться в активном слое торфяной залежи по отдельным месяцам на порядок, в нижних – не более чем в 2–3 раза. Варьирование показателей микробного обилия в инертных слоях торфяных залежей свидетельствует о реальном размножении хотя бы части микробного комплекса на глубине. При общей наблюдаемой закономерности распределения микробных комплексов в олиготрофном и эвтрофном болотах они различаются по запасам микроорганизмов и по характеру распределения микробной биомассы в торфяной залежи. Высокие запасы грибов в олиготрофной залежи обеспечивали максимальные значения микробной биомассы, которые в среднем в 2–4 раза выше, чем в низинных торфяниках. Существенный вклад в их микробную биомассу вносили верхние слои (в эвтрофной залежи микробная биомасса относительно равномерно распределялась по глубине торфяной залежи). В верховых залежах созданы условия для развития микроскопических грибов. Проведенные нами опыты [Головченко, Полянская, 2000] показали, что жизнеспособные грибы, являющиеся основными деструкторами органического вещества, можно выявить в любом слое торфяной залежи. Грибной мицелий обладал способностью прорасти в пределах верхней

метровой толщи, грибные споры – по всему профилю [Добровольская и др., 2013]. Доля жизнеспособных мицелия и спор грибов убывала с глубиной, но отмечалась по всему профилю олиготрофного торфяника (рис. 2).

В эвтрофной залежи для микромицетных комплексов складываются неблагоприятные условия, о чем свидетельствуют их низкая численность, неглубокое проникновение в торфяную залежь, доминирование спор в морфологической структуре. Подсчет запасов микробной биомассы в исследуемых торфяных залежах показывает, что в трехметровом профиле ее содержится десятки т/га. Важно отметить, что запасы микробной биомассы в торфяных болотах при сравнении их с собственным фондом углерода составляют незначительную долю. В исследуемых торфяных залежах доля углерода микробной биомассы (в процентах от общего углеродного пула) не превышала 3 % – в слое 0–50 см, 2 % – в слое 50–100 см и 0,2 % – на глубине 100–300 см. Для сравнения: доля углерода микробной биомассы в автоморфных почвах составляет 5–17 % в подстилках и 50–70 % – в минеральных горизонтах [Полянская, 1996; Головченко, Полянская, 2000].

Выше рассмотрены биохимические условия в торфяных залежах разных типов залежей, и, как следует из анализа, эти условия неравнозначны. Какое значение имеют эти условия при формировании газового режима в торфяной залежи?

Общие пределы изменения диоксида углерода в торфяном профиле изменяются от 0,05 до 0,6 ммол/л в олиготрофной залежи и от 0 до 1,2 ммол/л – в эвтрофной. За вегетационный период в олиготрофной залежи отмечается монотонная динамика  $\text{CO}_2$ , ход которой практически одинаков в 2011 и 2013 гг. (рис. 3). И только в мае происходит увеличе-

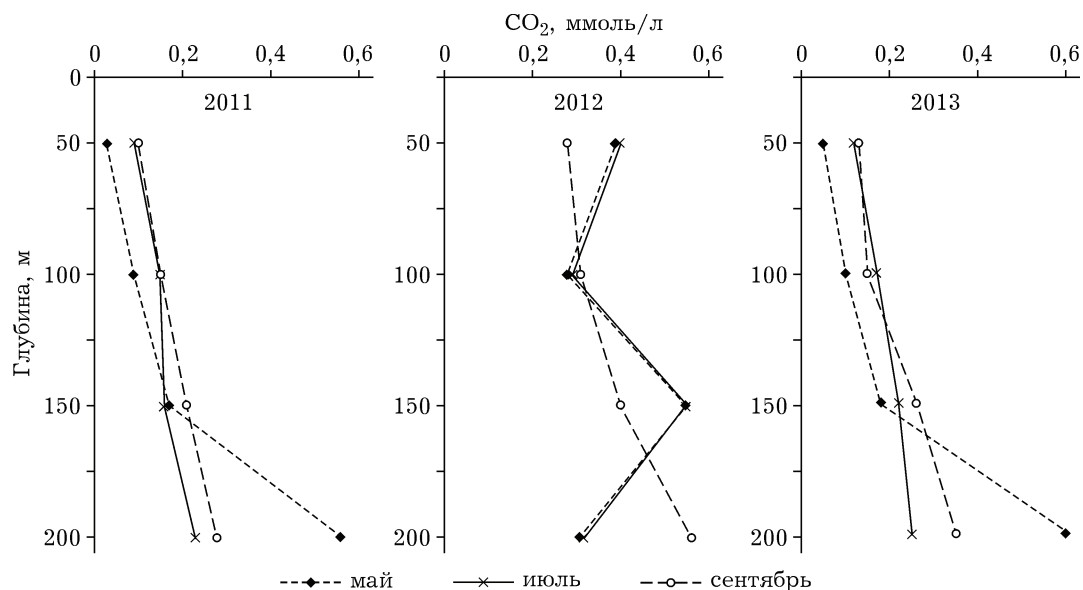


Рис. 3. Распределение диоксида углерода по профилю олиготрофной торфяной залежи

ние концентрации  $\text{CO}_2$  в 3 раза в нижней части торфяной залежи. В сухой по гидротермическим условиям 2012 г. за вегетационный период концентрация  $\text{CO}_2$  в несколько раз превышала другие годы. В мае и июле 2012 г. закономерность изменения концентрации  $\text{CO}_2$  отличалась от других лет. На глубине 100, 150 и 200 см в эти месяцы произошло соответственно резкое снижение, повышение и вновь снижение концентрации  $\text{CO}_2$  (в 2 раза) по профилю залежи. Можно также констатировать увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  в нижней части торфяной залежи олиготрофного болота, где переходная залежь сменяется низинной, химические свойства торфов которой существенно отличаются от верхового и переходного типов, а именно торфа становятся менее доступными для микрофлоры.

В эвтрофной торфяной залежи болота Таган динамика газового режима не превышала экстремальные значения концентрации  $\text{CO}_2$  олиготрофной залежи, но характер динамики оказался иным (рис. 4). Так, в сухой год (2012 г.) концентрация  $\text{CO}_2$  у поверхности залежи была близка к нулю, исключение составил май. Далее до глубины 150 см во все месяцы отмечалось увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  до 0,4 ммоль/л (меньше, чем в олиготрофной залежи) и последующее ее снижение до 0,2 ммоль/л. В торфяной залежи эвтрофного болота Таган особенно вы-

делились глубины 200 и 250 см в сентябре 2011 г. Концентрация  $\text{CO}_2$  достигла 1,2 ммоль/л, но в слое 250–300 см вновь приблизилась к 0,6 ммоль/л. Этот год отличается по газовому режиму в целом от других лет повышенными концентрациям  $\text{CO}_2$  в торфяной залежи.

Принимая во внимание отмеченные особенности динамики  $\text{CO}_2$  за трехлетний период в торфяных залежах разного генезиса, рассмотрим влияние газового состава на эмиссию  $\text{CO}_2$  за годы исследований (табл. 3).

Показатели эмиссии существенно выше на эвтрофном болоте Таган, и только на олиготрофном болоте отмечается поглощение  $\text{CO}_2$  в мае. Экстремальные значения эмиссии составили на Васюганье 22,16–47,41, на Тагане 11,50–129,20 мг  $\text{C}/\text{м}^2/\text{ч}$ , что характеризует их как невысокие по сравнению с другими аналогичными исследованиями [Billett, Moore, 2008; Augustin, Chojnicki, 2008; Dinsmore et al., 2010].

По гидротермическим условиям, как выше уже отмечалось, выделяется 2012 г. Газовый режим в олиготрофной торфяной залежи в мае, июле характеризовался довольно резкими изменениями по глубине, в особенности в нижних слоях торфяной залежи. Эмиссия в этот год была высокой только в мае. В мае 2011 и 2013 гг. отмечалось также значительное увеличение концентрации

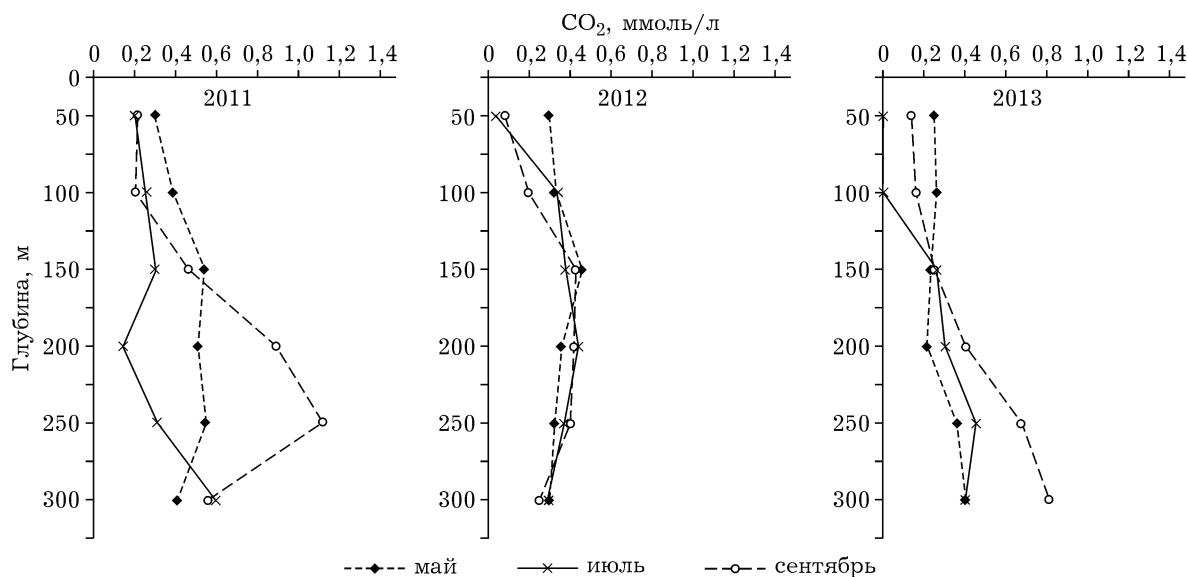


Рис. 4. Распределение диоксида углерода по профилю эвтрофной торфяной залежи

CO<sub>2</sub> в слое 200–250 см олиготрофной залежи, но показатели эмиссии оказались невысокими, и наблюдалось поглощение CO<sub>2</sub>. Рассчитанные коэффициенты корреляций эмиссии CO<sub>2</sub> с газовым составом в олиготрофной торфяной залежи за 3 года исследований показали отрицательную связь с концентраци-

ей CO<sub>2</sub> в слоях 150–200 см ( $r = -0,733$ ), 200–250 ( $r = -0,836$ ), 250–300 см ( $r = -0,839$ ).

Особенность газового режима в эвтрофной торфяной залежи заключалась в резком повышении в сентябре 2011 г. в слое 200–250 см концентрации CO<sub>2</sub>, но на эмиссии это не отразилось. Проведенные расчеты подтверди-

Т а б л и ц а 3

Эмиссия диоксида углерода и метана, мг С/м<sup>2</sup>/ч

Год	Месяц		
	май	июль	сентябрь
Васюган, CO <sub>2</sub>			
2011	-22,16 ± 0,3	31,16 ± 1,2	16,25 ± 2,5
2012	47,41 ± 5,2	14,58 ± 1,9	10,06 ± 3,8
2013	3,9 ± 0,6	29,3 ± 1,4	31,7 ± 2,3
Таган, CO <sub>2</sub>			
2011	73,76 ± 0,12	102,02 ± 1,09	89,13 ± 1,10
2012	72,25 ± 7,30	14,46 ± 0,60	129,20 ± 17,60
2013	16,50 ± 1,50	11,50 ± 1,50	87,90 ± 17,60
Васюган, CH <sub>4</sub>			
2011	-2,97 ± 0,2	2,14 ± 0,4	1,06 ± 0,2
2012	1,56 ± 0,3	3,42 ± 0,5	1,26 ± 0,2
2013	1,3 ± 0,3	2,8 ± 0,1	2,1 ± 0,1
Таган, CH <sub>4</sub>			
2011	5,14 ± 0,25	4,15 ± 0,22	1,56 ± 0,10
2012	11,36 ± 3,50	0,06 ± 0,01	0,93 ± 0,20
2013	8,50 ± 1,40	4,20 ± 2,60	1,20 ± 0,20



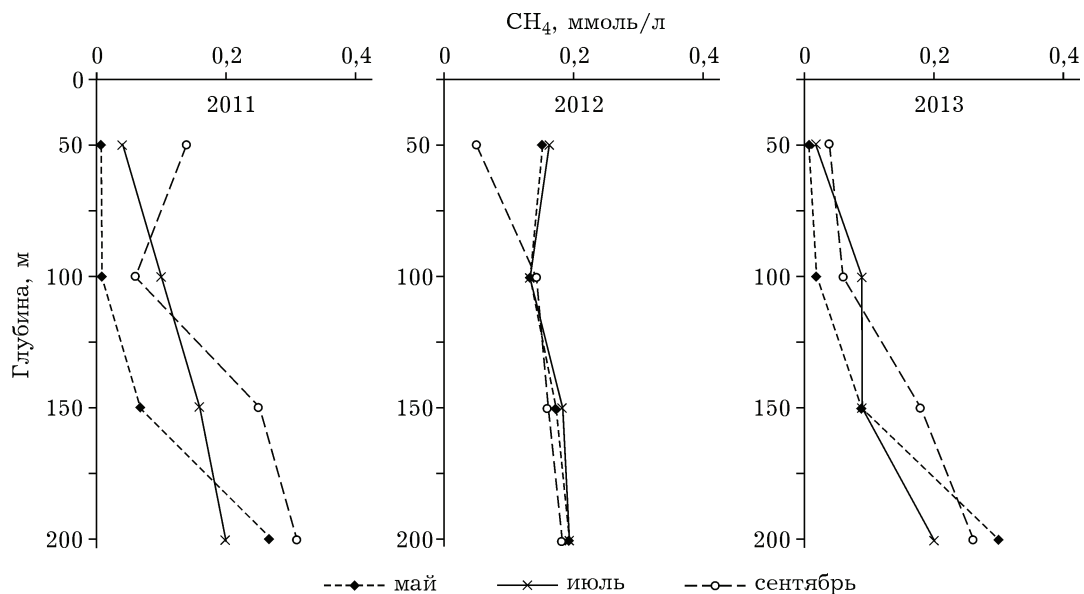


Рис. 5. Распределение метана по профилю торфяной залежи олиготрофного болота

ли отсутствие зависимости между эмиссией  $\text{CO}_2$  и концентрацией его в торфяной залежи, но выявлена связь с УБВ (0,582) и температурой на глубинах 120 и 160 см (соответственно  $r = -0,559$  и  $r = 0,623$ ).

Динамика метана в олиготрофной торфяной залежи имеет хорошо выраженную закономерность увеличения концентрации вниз по залежи (рис. 5). Однако пределы изменения концентрации метана небольшие (от 0,02 до 0,3 ммоль/л), и особых различий по месяцам не наблюдается. Эмиссия  $\text{CH}_4$  также невысокая, и, как в случае с эмиссией  $\text{CO}_2$ , в мае 2011 г. в олиготрофной залежи отмечается поглощение  $\text{CH}_4$ . Корреляционные связи прослеживаются между эмиссией метана и его концентрацией в торфяной залежи только в слое 250–300 см ( $r = -0,527$ ). Наряду с этим отмечаются связи между эмиссией и концентрацией  $\text{CO}_2$ , начиная с глубины 200 см ( $r$  от 0,5 до 0,7), и эмиссией метана и температурой в слое 0–120 см.

Динамика метана в профиле торфяной залежи эвтрофного болота характеризуется закономерностью, аналогичной распределению диоксида углерода (рис. 6). Также в сентябре 2011 г. происходит увеличение концентрации метана на глубине 200 и 300 см до их наибольших значений – 1 и 0,7 ммоль/л. Динамика эмиссии метана за годы исследований изменялась в широком диапазоне от

0,06 до 11,36 мг  $\text{C}/\text{м}^2/\text{ч}$ . Закономерность изменения эмиссии метана в июле и сентябре соответствует динамике диоксида углерода. Май можно считать исключением в отмечаемой закономерности.

По эмиссии  $\text{CH}_4$  в эвтрофной торфяной залежи наблюдается такая закономерность: в мае 2013 г. эмиссия самая высокая, в июле 2013 г. – несколько ниже, в то время как концентрация его по профилю характеризуется средними показателями. Рассчитанные коэффициенты корреляции эмиссии  $\text{CH}_4$  с газовым составом торфяной залежи за три года исследований показали, что связь с высокими значениями коэффициента корреляции проявляется только с температурой в слое торфяной залежи 40–160 см.

Известно, что оценка газовой функции может быть существенно занижена, поскольку часть газа аккумулируется в торфяной залежи, перераспределяясь в ней не только в газовой фазе, но и в адсорбированном состоянии. Это приводит к серьезным ошибкам в определении углеродного баланса на заболоченной территории, в особенности в условиях высокой степени заболоченности. Довольно сложно составить прогноз эмиссии газов из торфяной залежи с высокой точностью. Из рассмотренных выше связей между газовым составом и эмиссией парниковых газов исследуемых болот обращает на себя внимание тот

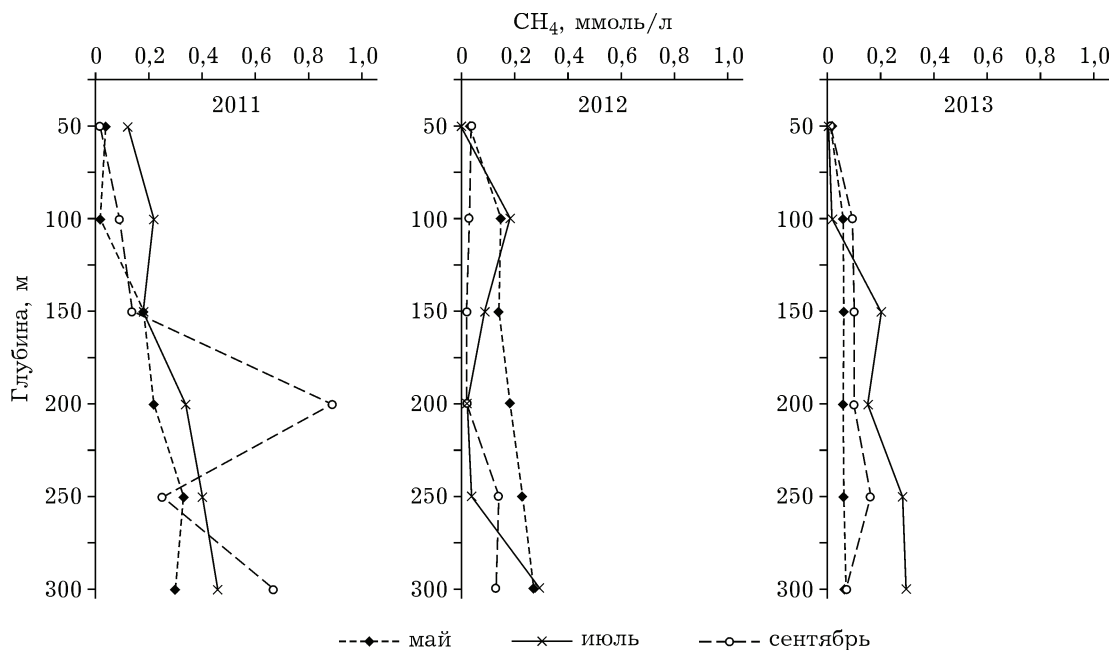


Рис. 6. Распределение метана по профилю торфяной залежи эвтрофного болота

факт, что концентрация  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в торфяной залежи почти постоянна. В то же время эмиссия газов часто характеризуется индивидуальной динамикой, а полученные корреляционные связи показывают, что каждый слой торфяной залежи оказывает определенное влияние на эмиссию парниковых газов. Кроме того, двухфазная система “болотная вода – газ” требует учета закономерностей карбонатно-кальциевого равновесия и его обратимости в растворах. А это, в свою очередь, ставит перед исследователями ряд проблем количественного описания подобных явлений. Как нам представляется, изучать динамику газового режима как составную часть углеродного баланса болот следует совместно с биохимическими процессами, причем одновременно и с учетом ботанического состава в торфяной залежи. Важны, конечно, и методы анализа.

Трехлетние наблюдения за динамикой биохимических процессов и газового режима позволили выявить невысокие экстремумы изменения газов в торфяных залежах болот олиготрофного и эвтрофного типов. Так, в олиготрофной залежи наибольшие концентрации  $\text{CO}_2$  имеют значения 0,6 ммоль/л, в эвтрофной – 1,2 ммоль/л. Схожие цифры приводятся и у других авторов. Например,

А. В. Наумов [1994; 2002] в своих работах показал, что концентрация  $\text{CO}_2$  в торфяных почвах изменяется от 0,12 до 3,16 ммоль/л, в работах Г. А. Махова [1994] и Н. М. Бажина [2000] концентрация  $\text{CO}_2$  колеблется в пределах 0,04–1,98 ммоль/л. Увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  вниз по торфяной залежи отмечается только в олиготрофном варианте, и связано это, надо полагать, с резким изменением в смене верховой, переходной и далее низинной залежи, в которой и происходит увеличение концентрации  $\text{CO}_2$ . Таким образом, тип залежи, характер сложения также оказывают влияние на направленность биохимических процессов.

Аналогичные рассуждения правомочны и для динамики в торфяных залежах  $\text{CH}_4$ . Существует мнение, что торфяные болота выделяют много метана. Однако даже в одной торфяной залежи могут возникать различные условия, при которых метан будет выделяться или поглощаться. На глубине окислительно-восстановительные условия – облигатно восстановительные, а с глубины 120–150 см отмечается и постоянство температуры. Но, как рассмотрено выше, микрофлора достаточно активна в этих условиях и способствует образованию парниковых газов, в том числе и метана. Возможно, это и является причи-

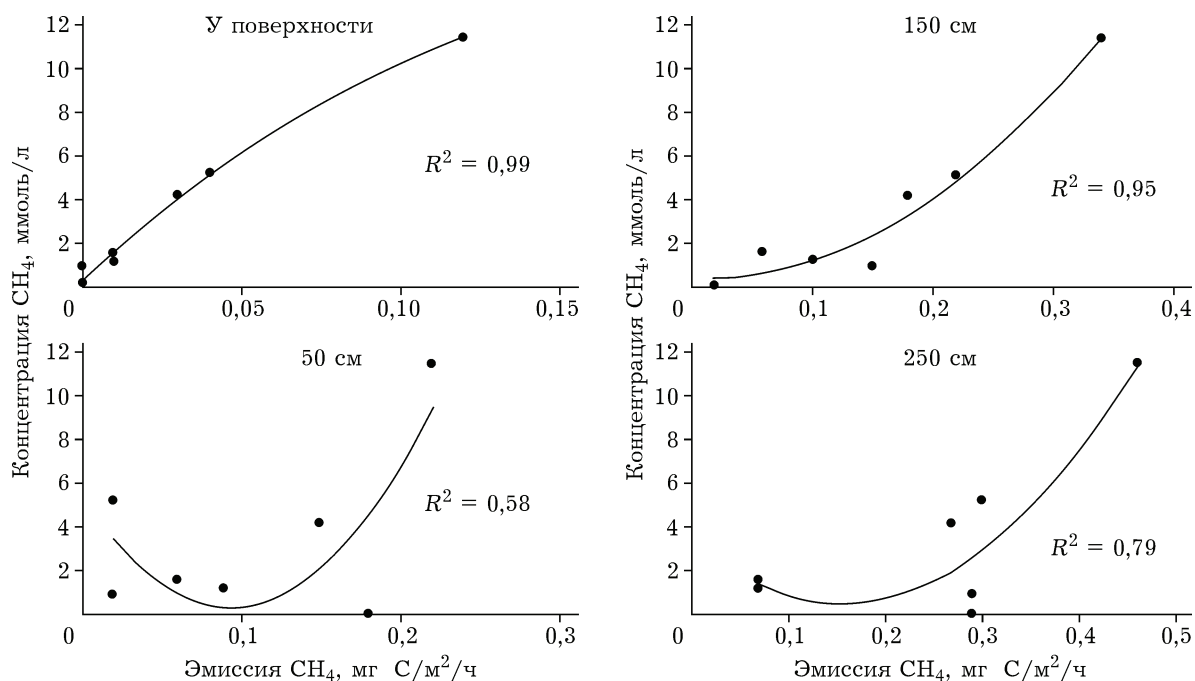


Рис. 7. Зависимость эмиссии метана от его концентрации в эвтрофной торфяной залежи, Таган

ной проявляющихся связей между концентрацией метана в профиле и его эмиссией (рис. 7). Причем эти связи различаются в зависимости от слоя торфяной залежи.

В работах ученых [Inoue et al., 1995] показано, что потоки метана из болот низинного типа характеризовались коэффициентом вариации от 80 до 240 %, параметры скорости эмиссии метана при этом изменялись от 20 до 2400 мг CH<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup>сут). А. В. Смагин [2005] приводит механизм образования метана: в болотах формируется глубинный анаэробный слой ( $Eh < -150$  мВ) с активным образованием метана и поверхностный слой его окисления ( $Eh > 150$  мВ), в котором развиваются метанотрофные бактерии. В результате значительная часть газа (от 30 до 80 %) по данным К. Yagi [1997] окисляется, не доходя до атмосферы.

Что мы наблюдаем в торфяных залежах естественных болот? Практически во все годы исследований вся торфяная залежь, за исключением поверхностных 10–30 см (в условиях снижения уровня болотных вод), характеризуется резко отрицательными значениями  $Eh$  (от  $-150$  до  $-250$  мВ за 2011–2013 гг.). Но динамика газового состава в торфяном профиле не подчиняется выше обозначенному положению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамика газового режима и эмиссия парниковых газов в торфяных залежах олиготрофного и эвтрофного болот определяются погодными условиями, а также биохимическими процессами, формирующимися в торфяных залежах.

Концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в торфяных залежах исследуемых болот характеризуются небольшими пределами изменения от 0,06 до 1,2 ммоль/л. Концентрация парниковых газов с глубиной преобладающе увеличивается, что согласуется с изменением степени разложения торфов, а следовательно и химического состава торфяных слоев, и увеличением активности биоты в торфяной залежи.

Динамика концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в торфяной залежи контролируется активностью микрофлоры. Получен ряд свидетельств о том, что микроорганизмы в торфах находятся в жизнеспособном состоянии даже в глубоких слоях торфяников. Однако на данном этапе мы можем говорить только о потенциальной активности тех или иных процессов. В структуре микробной биомассы торфяной залежи исследуемого торфяника преобладает грибная составляющая. В верхних слоях она представлена мицелием, в нижних –

преимущественно спорами грибов и дрожжеподобными клетками. В нижних слоях становится высокой не только доля спор, но и доля бактериальных клеток.

Эмиссия парниковых газов определяется динамикой газового режима каждого слоя торфяной залежи, что подтверждается корреляционными зависимостями.

Сложная система, которую представляет собой болото, предполагает более тщательные исследования ее органической и биологической составляющих для прогнозирования формирования газового состава, эмиссии и в целом бюджета углерода в болотах. В настоящее время мы пока имеем фрагментарные знания о групповом и фракционном составе органического вещества торфов, трансформации в них форм углерода и биохимических процессах, происходящих в торфяной залежи на фоне окислительно-восстановительных условий, формирующихся непосредственно в торфяной залежи болота.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (госзадание ТГПУ № 174) и гранта РНФ (№ 14-17-00038).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бажин Н. М. Эмиссия метана из осадочных слоев // Сокращение эмиссии метана. 2000. С. 239–244.
- Бегак Д. А., Беликова Н. М. Количество и распределение микроорганизмов в верховых торфяниках // Тр. науч.-исслед. торфяного ин-та. 1934. Вып. 14. С. 44–79.
- Васильев С. В. Скорость торфонакопления в Западной Сибири // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2000. С. 56–59.
- Вомперский С. Э., Цыганова О. П., Ковалев А. Г., Глухова Т. В., Валяева Н. А. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода // Глобальные изменения природной среды и климата. М.: Изд-во РАН, 1999. С. 124–145.
- Головченко А. В., Добровольская Т. Г., Инишева Л. И. Структура и запасы микробной биомассы в олиготрофных торфяниках южно-таежной подзоны Западной Сибири // Почвоведение. 2002. № 12. С. 1468–1473.
- Головченко А. В., Полянская Л. М. Особенности годовых сукцессий микроорганизмов в почвах южной тайги (на примере ЦЛГБЗ) // Там же. 2000. № 4. С. 141–147.
- Добровольская Т. Г., Головченко А. В., Звягинцев Д. Г., Инишева Л. И., Кураков А. В., Смагин А. В., Зенова Г. М. Функционирование микробных комплексов в верховых торфяниках. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2013. 128 с.
- Зименко Т. Г. Микробные ценозы торфяных почв и их функционирование. Минск, 1983. 179 с.
- Инишева Л. И., Дементьева Т. В. Интенсивность трансформационных процессов в торфах разного ботанического состава // Сиб. вестн. с/х науки. 1998. № 3–4. С. 18–23.
- Курбатова-Беликова Н. М. Развитие микроорганизмов в торфе в зависимости от его вида и степени разложения. // Тр. Ин-та торфа. 1960. Т. 9. С. 222–230.
- Лисс О. Л. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
- Махов Г. А. Эмиссия метана из болот междуречья рек Оби и Томи // Химия в интересах устойчивого развития. 1994. № 2. С. 619–622.
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д. Г. Звягинцева М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1991. 303 с.
- 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.
- Наумов А. В. Углекислый газ и метан в почвах и атмосфере болотных экосистем Западной Сибири // Там же. 2002. № 3. С. 313–318 [Naumov A. V. Carbon Dioxide and Methane in Soils and Atmosphere of Swamp Ecosystems in West Siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2002. № 3. P. 313–318].
- Панкратов Т. А., Белова С. Э., Дедыш С. Н. Оценка филогенетического разнообразия прокариотных микроорганизмов в сфагновых болотах методом FISH // Микробиология. 2005. Т. 74, № 6. С. 831–837.
- Полянская Л. М. Микробная сукцессия в почве: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1996. 96 с.
- Полянская Л. М., Головченко А. В., Звягинцев Д. Г. Определение жизнеспособности спор и мицелия почвенных грибов // Микробиология. 1999. Т. 67, № 6. С. 832–836.
- Смагин А. В. Газовая функция почв. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2005. 301 с.
- Шинкарева Т. А. Изменение микрофлоры разлагающихся растений-торфообразователей // Тр. Ин-та торфа. 1960. Т. 9. С. 231–239, 240–251.
- Augustin J., Chojnicki B. Austausch von klimarelevanten Spurengasen, Klimawirkung und Kohlenstoffdynamik in den ersten Jahren nach der Wiedervernässung von degradiertem Niedermoorgrünland // Phosphor- und Kohlenstoffdynamik und Vegetation sentwicklung in wiedervernässften Mooren des Peenetales in Mecklenburg-Vorpommern / eds J. Gelbrecht, D. Zak, J. Augustin. Berlin: Berichte des IGB. 2008. S. 50–67.
- Billett M. F., Moore T. R. Supersaturation and evasion of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in surface waters at Mer Bleue Peatland, Canada // Hydrological Proc. 2008. Vol. 22. P. 2044–2054.
- Bridges E. M., Batjes N. H. Soil gaseous emissions and global climate change // Geography. 1996. Vol. 81, N 2. P. 155–169.
- Chapman S. J. Estimating carbon stocks in peatlands: the Scottish Experience // Proceedings of the 13th International Peat Congress. "After Wise Use – The Future of Peatlands" (8–13 June 2008, Tullamore, Ireland): Oral Presentations. Tullamore, Ireland. Vol. 1. P. 569–571.

- Dinsmore K. J., Billett M. F., Skiba U., Rees R. M., Dre-  
wer J., Helfter C. Role of the aquatic pathway in the  
carbon and greenhouse gas budgets of a peatland  
catchment // *Global Change Biol.* 2010. Vol. 16.  
P. 2750–2762.
- Inoue G., Maksyutov S., Panikov N. Proceedings of the  
Third SJSPSJR in 1994, Sapporo. Sapporo: iWORD,  
1995. P. 37–43.
- Steinmann Ph., Shotykh W. Sampling anoxic pore water  
in peatlands using “peepers” for in situ-filtration //  
*Fresenius Journ. Anal. Chem.* 1996. P. 709–713.
- Tolonen K., Vasander H., Damman A. W., Clymo R. S.  
Preliminary estimates of long-term carbon accumula-  
tion and loss in the 25 boreal peatlands // *Suo.* 1993.  
Vol. 43, N 4–5. P. 277–280.
- Vitt D. H., Beilman D. V., Halsey L. A. Spatial and temporal  
trends in carbon storage of peatlands of continental  
western Canada through the Holocene // *Canad.  
Journ. Earth Sci.* 2000. Vol. 37. P. 283–287.
- Yagi K. Methane emission from paddy fields // *Bull. Natl.  
Inst. Agroenviron. Sci.* 1997. Vol. 14. P. 96–210.

## Biochemical Processes and Gas Conditions of Bogs of Different Genesis

L. I. INISHEVA<sup>1</sup>, A. V. GOLOVCHENKO<sup>2</sup>, M. A. SERGEEVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Tomsk State Pedagogical University  
634061, Tomsk, Kiyevskaya str., 60*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1  
E-mail: inisheva@mail.ru, agroecol@yandex.ru*

The study of biochemical processes of gas conditions formation in oligotrophic and eutrophic peat deposits of bogs in Western Siberia in 2011–2013 was presented. It was shown that the dynamics of formation of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in a peat deposit was controlled by the activity of microorganisms. The correlations between CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission and gas conditions of the peat deposits were determined. The peculiarities of biochemical processes running in oligotrophic and eutrophic peat deposits were specified.

**Key words:** peat bog, Western Siberia, transformation of organic matter, carbon dioxide, methane, microflora, gas conditions, emission.