

УДК 579.222.4+551.312.2

БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В БОЛОТАХ ГОРНОГО АЛТАЯ

© 2016 г. Л. И. Инишева¹, А. В. Головченко², Г. В. Ларина³

¹Томский государственный педагогический университет
634061 Томск, Киевская, 60
e-mail: inisheva@mail.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991 Москва, Ленинские горы
e-mail: golovchenko.alla@gmail.com

³Горно-Алтайский государственный университет
649000 Горно-Алтайск, Ленкина, 1
e-mail: gal29977787@yandex.ru

Поступила в редакцию 2015 г.

На болотном стационаре в Северо-Восточном Алтае с 2009 г. проводятся мониторинговые исследования режимов болот. В статье приводятся результаты биологической активности (показатели обилия микроорганизмов, респирометрические показатели и каталаза) в торфяных залежах эвтрофного (Турочак) и мезотрофного (Кутюшское) болот в течение вегетационных периодов 2012–2013 гг. при разных уровнях болотных вод и окислительно-восстановительных условиях.

Содержание парниковых газов в атмосфере продолжает увеличиваться. Из данных станции мониторинга Мауна Лоа на Гавайях, где проводятся непрерывные наблюдения за концентрацией парниковых газов в атмосфере с 1958 г. (Hansen et al., 2008), известно, что современная концентрация углекислого газа за 2011 г. составила 391.57 ppmv, в то время как в 1959 г. она равнялась 315.8 ppmv (среднегодовые значения). Скорость роста содержания диоксида углерода также увеличилась в последние годы. Если в 1992–2001 гг. она составляла 1.55 ppmv/год, то в прошедшее десятилетие (2003–2012 гг.) возросла до 2.0 ppmv/год (напомним, что в начале периода наблюдений на Мауна Лоа, т.е. во второй половине XX столетия, эта скорость не превышала 0.7–1.0 ppmv/год).

В условиях увеличения содержания углерода в атмосфере наиболее ценными являются биогеоценозы, которые способны поглотить больше CO₂ из атмосферы и как можно меньше вернуть обратно. Таковыми и являются болота. Поэтому растущие болота являются уникальными в наземной биоте экологическими системами, связывающими на длительный период CO₂ атмосферы и этому вопросу посвящены многие работы (Глебов и др., 2000; Vitt et al., 2000; Тарко, 2010; Tolonen et al.,

1992 и др.). Вот почему столь важно сохранить естественное функционирование торфяно-болотных 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 неисследованными несмотря на большое значение болот в проблеме круговорота углерода в биосфере. Поэтому изучение скорости протекания биохимических процессов в торфяных залежах (ТЗ) болот в разных погодных условиях с одновременным контролем газового режима всегда актуально. Одними из наиболее интересных природных образований являются горные торфяные болота. Причины образования болот в сибирских горах, располагающихся в центре континента, в области с сухим континентальным климатом, весьма разнообразны. Биологическая активность и эмиссия газов болот Горного Алтая до сих пор не изучалась.

Цель данной работы – выявление особенностей биохимического и газового режимов в торфяных залежах горных болот.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория Алтая по типам структуры вертикальной почвенной поясности разделяется на три региона – Северный Алтай, Центральный Алтай и Юго-Восточный Алтай, различающихся не только высотными уровнями, но и общими биоклиматическими особенностями. При изучении торфообразования наибольший интерес среди многообразия форм горного рельефа представляют такие орографические элементы, как межгорные котловины и расширенные участки долин, получившие у некоторых авторов название “частные впадины”. Наибольшие площади болот сосредоточены в Северо-Восточном Алтае, где выпадает большое количество осадков и значительна мощность снегового покрова при невысоких уклонах стока вод по сравнению с другими районами Горного Алтая. На этой территории в Турочакском районе Республики Алтай и был организован болотный стационар, в состав которого вошли два болота – Турочак и Кутюшское. Эвтрофное болото Турочак (52°13' с.ш. и 87°06' в.д.) можно отнести к присклоновому. Оно формируется в основном за счет резкого замедления скорости поверхностного и внутрпочвенного стока при изменении угла наклона поверхности от крутых склонов к слабонаклонной присклоновой части, которая и является генетическим центром этого болота. Растительность характеризуется древесно-осоковым фитоценозом. Древесный ярус представлен березой высотой около 8 м, диаметром около 10 см, встречается сосна. Подлесок средней густоты, образован ивой, средняя высота 2 м. Травяной ярус представлен в основном осокой, реже отмечены хвощ, папоротник. Микрорельеф кочковатый – осоково-моховые кочки высотой 0.2 м. Возраст болота – 7060 ± 90 лет.

Торфяное мезотрофное болото Кутюшское (52°18' с.ш. и 87°15' в.д.) имеет смешанное атмосферно-грунтовое питание, характеризуется как переходное и относится к долинному типу. Растительность представлена безлесным пространством, в отдельных местах произрастает береза высотой 2–4 м с редкой сосной и, наоборот, сосна с редкой березой. В травяном ярусе отмечены осоки лазиокарпа, диандра, лимоза. Моховой ярус сложен сфагновыми мхами.

Для изучения биологической активности проводился отбор проб торфа в 5 – кратной повторности торфяным буром ТБГ в соответствии с ботаническим составом. Радиоуглеродное датирование торфяных залежей (ТЗ) проведено на радиоуглеродной установке QUANTULUS-1220 (бензольно-сцинтилляционный вариант) в лаборатории геологии и

палеоклиматологии кайнозоя Института геологии и минералогии СО РАН, ботанический состав и степень разложения торфа – по ГОСТ 28245-89.

Общую численность и биомассу микроорганизмов определяли прямым методом с использованием люминесцентной микроскопии. При количественном учете клеток бактерий препараты окрашивали водным раствором акридина оранжевого, для окраски мицелия и спор грибов применяли калькофлуор белый (Головченко и др., 2008). Численность аммонификаторов и амилолитиков изучали классическими методами, путем высева почвенных суспензий на диагностические среды: мясо-пептонный агар (МПА); крахмало-аммиачный агар (КАА) (Методы почвенной микробиологии ..., 1991).

Определение респирометрических микробиологических показателей (базальное дыхание (БД), микробная биомасса (БМ), микробный метаболический коэффициент (QR)) проводилось методом субстрат-индуцированного дыхания на газовом хроматографе “Кристалл–5000.1” (Ананьева, 2003; Anderson, Domsch, 1978). Микробную биомассу определяли на сухую навеску торфа путем пересчета скорости субстрат-индуцированного дыхания (СИД). Микробный метаболический коэффициент (QR) рассчитывали как отношение БД/СИД.

В эти же сроки определяли эмиссию CO₂ и CH₄ камерно-статическим методом, анализ газового состава проводился на газовом хроматографе “Кристалл-5000.2”.

В образцах торфа определяли также каталазную активность газометрическим методом в модификации Ю.В. Круглова и Л.Н. Пароменской (Инишева и др., 2003). Все другие лабораторные исследования проводились в Испытательной лаборатории Томского государственного педагогического университета (№ РОСС RU.0001.516054) по Е.Т. Базину с соавторами (1992).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Торфообразование – это процесс превращения болотных растений в качественно иное образование, торф. При этом происходят два взаимообусловленных явления: с одной стороны разложение сложных органических соединений, входящих в состав отмерших растительных тканей, а с другой создаются новые не менее сложные соединения, что обусловлено работой микроорганизмов. Еще совсем недавно при недостатке научных данных и соответствующих методах изучения микрофлоры предполагалось, что основное разрушение остатков растений происходит только в аэробной среде,

Таблица 1. Общетехнические и химические свойства торфов исследуемых болот

Вид торфа, тип залежи	Ботанический состав, %	Глубина, см	R, %	A, % по массе	pH	N общий, %	ГК/ФК
Болото Турочак							
Древесно-осоковый, Н	<i>Древесина</i> , 25; <i>C. lasiocarpa</i> , 20; <i>C. Rostrata</i> , 5; <i>C. omskiana</i> , 50	0–100	20	–	4.4	–	–
Осоковый, Н	<i>Древесина</i> , 10; <i>C. lasiocarpa</i> , 25; <i>C. rostrata</i> , 10; <i>C. omskiana</i> , 45; <i>Comarum palustre</i> , 5; <i>Хвоц</i> , 5	100–150	35	30.6	4.4	–	<u>50.6</u> 10.0
Травяной, Н	<i>Древесина</i> , 5; <i>C. lasiocarpa</i> , 20; <i>C. rostrata</i> , 25; <i>C. cespitosa</i> , 10; <i>Хвоц</i> , 20; <i>Вахта</i> , 20	150–200	40	38.5	4.5	2.98	<u>45.0</u> 13.1
Древесно-травяной, Н	<i>Древесина</i> , 20; <i>C. lasiocarpa</i> , 25; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>C. cespitosa</i> , 10; <i>Хвоц</i> , 30; <i>Вахта</i> , 10	200–250	45	21.4	4.5	2.58	<u>52.4</u> 13.7
Травяной, Н	<i>Древесина</i> , 5; <i>C. lasiocarpa</i> , 35; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>C. cespitosa</i> , 20; <i>Хвоц</i> , 31; <i>Вахта</i> , 25	250–300	55	34.4	–	–	–
Травяной, Н	<i>Древесина</i> , 5; <i>C. lasiocarpa</i> , 25; <i>C. rostrata</i> , 25; <i>Хвоц</i> , 20; <i>Вахта</i> , 25	300–350	60	26.5	4.7	2.92	<u>56.5</u> 11.4
Травяной (вахтовый), Н	<i>C. lasiocarpa</i> , 10; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>C. cespitosa</i> , 5; <i>Вахта</i> , 65; <i>Хвоц</i> , 15	350–400	60	21.7	4.7	–	–
Травяной (вахтовый), Н	<i>Древесина</i> , 5; <i>C. lasiocarpa</i> , 10; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>Вахта</i> , 65; <i>Хвоц</i> , 15	400–450	55	19.7	4.7	1.98	<u>43.2</u> 20.1
Болото Кутюшское							
Магелланикум-торф, В	<i>Sphagnum magellanicum</i> , 85; <i>Sphagnum fuscum</i> , 10; <i>Sphagnum angustifolium</i> , 5	0–25	0	2.8	3.8	2.04	–
Ангустифолиум-торф, В	<i>Кустарнички</i> , 5; <i>Sphagnum magellanicum</i> , 5; <i>Sphagnum angustifolium</i> , 75; <i>E. polystachyon</i> , 15	25–50	15	17.9	3.9	–	–
Магелланикум-торф, В	<i>Sphagnum magellanicum</i> , 90; <i>Sphagnum angustifolium</i> , 5; <i>E. polystachyon</i> , 5	50–100	0–5	3.2	4.0	5.28	<u>14.1</u> 25.0
Балтикум-торф, В	<i>Sphagnum magellanicum</i> , 5; <i>Sphagnum angustifolium</i> , 15; <i>Sphagnum balticum</i> , 50; <i>Sphagnum majus</i> , 15; <i>Sphagnum flexuosum</i> , 10; <i>E. polystachyon</i> , 5	100–150	10	4.2	4.1	5.72	<u>20.4</u> 20.0
Шейхцериевый, П	<i>Кустарнички</i> , 5; <i>C. lasiocarpa</i> , 5; <i>C. rostrata</i> , 5; <i>Шейхцериа</i> , 70; <i>Sphagnum magellanicum</i> , 5; <i>Sphagnum balticum</i> , 5; <i>E. polystachyon</i> , 5	150–175	35	6.1	4.1	–	<u>40.3</u> 16.0
Шейхцерииво-осоковый, П	<i>C. lasiocarpa</i> , 15; <i>C. rostrata</i> , 40; <i>Шейхцериа</i> , 25; <i>Вахта</i> , 5; <i>E. polystachyon</i> , 5; <i>Sphagnum (magellanicum, centrale)</i> , 10	175–200	40	8.3	4.2	–	–

Примечание. Тип залежи: В – верховой, П – переходный, Н – низинный; R – степень разложения; A – зольность; ГК – гуминовые кислоты, % на органическое вещество; ФК – фульвокислоты, % на органическое вещество; pH – кислотность среды; “ – “ измерение не проводилось.

т.е. в верхнем слое ТЗ, а нижняя часть профиля инертна. Исходя из этого, исследованию подвергался слой ТЗ, мощностью не более 1 м. В наших исследованиях взяты два типа торфяных болот, существенно различающихся по генезису, в которых изучалась микрофлора в торфяной залежи в соответствии с ботаническим составом каждого слоя до подстилающих пород (табл. 1). Горные болота различаются между собой по генезису и условиям развития болотообразовательного процесса, а также по характеру растительности, отражающей своим составом специфические условия горного пояса. Качественные показатели торфов Горного Алтая явно отличны от других территорий. Прежде всего, следует отметить высокую степень разложения торфов. Другая особенность заключается в богатом видовом составе фитоценозов, что вероятней всего и явилось причиной химического состава горных торфов и как следствие – высокой степени их разложения.

Торфяная залежь болота Турочак состоит: с поверхности до глубины 150 см из древесно-осокового торфа со степенью разложения 20–35% и зольностью 30–38%; далее, до глубины 350 см из травяного и древесно-травяного торфа с включениями (до 25%) вахты и хвоща (20–30%) со степенью разложения 40–60 % и зольностью 21–34 %; на глубине 350–450 см – из травяного торфа с большой примесью вахты (до 65%). Важно заметить, что главной причиной, определяющей интенсивность распада остатков болотных растений, является не длительность распада (возраст), а состав органического вещества, имеющий различную микробиологическую устойчивость. Так, мхи за 100 лет распадаются на 5–15%, а целлюлоза лиственных пород на 85–99%. У некоторых видов торфа условия для развития растений и микроорганизмов специфичны и стабильны, что и обеспечивает глубину распада органического вещества под воздействием микробов.

Болото Кутюшское до 150 см представлено верховыми торфами со степенью разложения 5–10% и зольностью 2.8–7.9%. С глубины 150 см залегает переходный шейхцериевый торф (содержание шейхцерии достигает 70%), в котором резко повышается степень разложения по сравнению с вышерасположенным слоем (до 35%). Далее следует шейхцерииво-осоковый переходный торф со степенью разложения 40% и зольностью 8.3%. Следует отметить низкий рН торфов Кутюшского болота, что объясняется подстилающими породами и ботаническим составом торфов, слагающих ТЗ болота.

Заметим, что традиционно в составе органического вещества торфа различают четыре основные группы веществ: битумы (или липиды), углеводный комплекс, лигнин (негидролизуемый остаток) и гумусовые кислоты, состоящие из гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК). Отмеченное выше высокое содержание в горных торфах гумусовых кислот характеризует неблагоприятные условия для функционирования микробного комплекса (табл. 1). Валовое содержание азота выше в торфах Турочакского болота. Известно, что низкая обогащенность азотом органического вещества остатков растений не способствует активизации микробиологической деятельности и приводит к снижению темпов трансформации растительных остатков при торфообразовании. Таким образом, можно констатировать лучшую обеспеченность питательными элементами микробных сообществ торфов в эвтрофном болоте Турочак. Надо полагать, что косвенно (по высокой зольности) хорошая степень обеспеченности относится и к микроэлементам. Проанализируем поведение микроорганизмов в столь разных условиях.

Из основных микробных функциональных групп, принимающих участие в процессе торфогенеза исследуемых болот, рассмотрим распределение по профилю аммонификаторов и амилаolitikов на примере их динамики в течение вегетационного периода 2012 г. по всему профилю ТЗ (рис. 1, 2).

Выше рассмотренные химические свойства торфов в ТЗ эвтрофного и мезотрофного болот оказали влияние на его биологическую составляющую. Численность аммонификаторов, минерализующих органический азот, и микроорганизмов, предпочитающих минеральные формы азота, превалирует в случае мезотрофной истории формирования торфяного профиля, что и наблюдается в ТЗ болота Кутюшское.

Проведенные исследования показали, что и аммонификаторы и амилаolitikи, разрушающие органическое вещество торфов, имеют тренд к увеличению численности в нижних слоях ТЗ, характеризующихся высоким уровнем гумификации. В меньшей степени это проявляется в ТЗ мезотрофного болота. Динамика численности рассматриваемых физиологических групп микроорганизмов в ТЗ за вегетационный период также неоднозначна. В мезотрофной залежи отмечается резкое увеличение аммонификаторов в сентябре во всех слоях кроме прилегающего к подстилающей породе 155–175 см, в эвтрофной увеличение происходит в мае (верхняя часть ТЗ) и в июле (нижняя часть ТЗ). Похожая динамика в эвтрофной ТЗ отмечается и для микроорганизмов, усваивающих

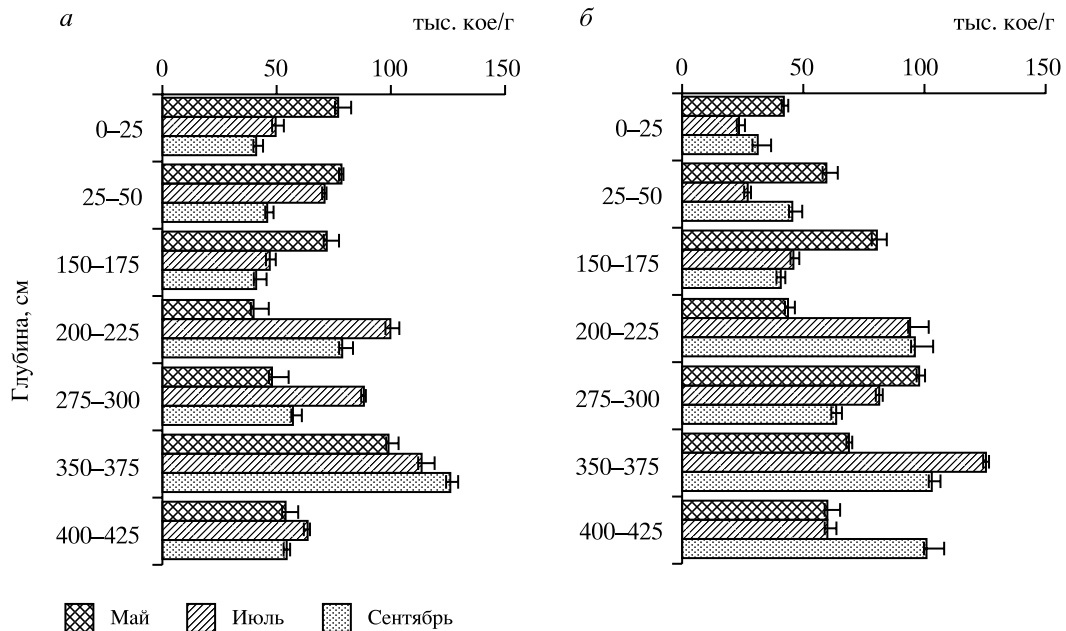


Рис. 1. Динамика численности физиологических групп бактерий по профилю торфяной залежи: *a* – аммонификаторов и *б* – амилолитиков; болото Турочак, 2012 г.; для рис. 1–6: \pm – доверительный интервал; для рис. 1, 2: кое/г – колониеобразующие единицы на грамм торфа.

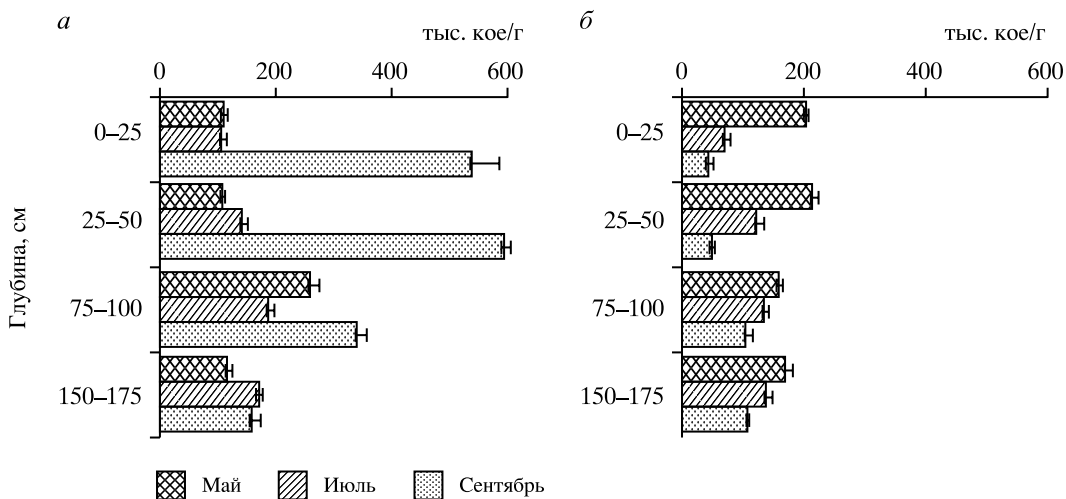


Рис. 2. Динамика численности физиологических групп бактерий по профилю торфяной залежи: *a* – аммонификаторов и *б* – амилолитиков; болото Кутюшское, 2012 г.

минеральные формы азота (КАА), в то время как в мезотрофной ТЗ предпочтение отдано по всему профилю – маю.

Двухлетний мониторинг численности различных групп микроорганизмов был осуществлён люминесцентно-микроскопическим методом. Этот метод получил признание в экологических лабораториях мира, так как обеспечивает высокую полноту учёта как бактерий, так и грибов. Анализируемые года характеризуются теплой погодой (средняя температура за май–сентябрь

выше среднемноголетней в 1.2 раза) и невысокой увлажненностью (в 2012 г. выпало осадков в 1.6 раз меньше по сравнению с многолетними наблюдениями и в 1.3 раза – в 2013 г.). По отдельным месяцам выделялись сентябрь и июнь, которые в 2012 г. характеризовались засушливой погодой, а в 2013 г. – наоборот, сырой (табл. 2). Это не могло не сказаться на динамике численности микроорганизмов в ТЗ.

За два года исследований отмечается общая закономерность: показатели обилия микроорга-

Таблица 2. Погодные условия, метеостанция Турочак, 2012/2013 г.

Метеорологическая характеристика	Месяц					Май–сентябрь
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
Температура воздуха, °С	9.4/11.0	15.1/17.0	18.7/17.5	17.4/16.7	9.9/14.2	14.1/15.3
Среднегодовое значение температуры воздуха, °С	9.9	14.4	16.8	14.7	8.4	12.8
Осадки, мм	89/80	40/90	77/81	93/80	35/96	335/427
Среднегодовое значение осадков, мм	80	115	135	127	78	535
ГТК по Селянинову	1.1/0.9	0.8/1.8	1.3/1.5	1.7/1.5	0.5/2.3	1.1/1.6
Среднегодовое значение ГТК	0.8	1.7	1.8	1.6	1.5	1.5

Примечание. ГТК – гидротермический коэффициент, вычисляемый из соотношения суммы осадков за определенный период к сумме среднесуточных температур за период с температурой более 10° С.

низмов (бактерии, мицелий и споры грибов) постепенно снижаются в торфяном профиле в сторону подстилающей породы. Это отмечается и в эвтрофном (Турочак) и мезотрофном (Кутюшское) болотах (рис. 3–6). Следует заметить, что если численность бактерий и спор грибов характеризуется близкими значениями в ТЗ обоих болот и в 2012 г. и 2013 г., то длина грибного мицелия в ТЗ эвтрофного болота в 2 раза выше, чем в ТЗ мезотрофного болота. Однако в целом показатели обилия грибного мицелия в исследуемых болотах характеризуются низкими величинами, так как в эвтрофных болотах основная роль принадлежит бактериальному блоку (Головченко и др., 2006, 2007). Грибной мицелий приурочен в основном к верхним слоям, учитывая, что немногие виды могут развиваться на больших глубинах. Вместе с тем и на глубине 150–175 см Кутюшского болота, и на глубине 425 см болота Турочак мицелий присутствует, но его длина в 6 раз меньше, чем в поверхностном слое. Обнаружение грибного мицелия на глубине объясняют разными причинами, в том числе и проникновением в глубину ТЗ мигрирующих вод, насыщенных кислородом (Дырин, Красноженов, 2007). Но процесс миграции вод в ТЗ довольно длительный 10–20 лет (Бахнов, 1986), а динамику численности бактерий и длины грибного мицелия – активного компонента грибного комплекса можно наблюдать в течение вегетационного периода. Так, независимо от увлажненности года как в эвтрофном, так и в мезотрофном болотах в июле отмечается высокие показатели численности бактерий и длины грибного мицелия (примерно на 14%) во всем торфяном профиле по сравнению с остальными месяцами (рис. 3–6). Таким образом, процесс преобразования органического вещества микробным блоком в течение вегетационного периода имеет монотонный характер, слабо зависит

от погодных условий и степени переувлажнения торфяного профиля (уровень болотных вод не опускается ниже 40 см).

Рассмотрим далее взаимосвязь величины микробной биомассы и ее дыхательной активности (метод СИД) как показателей активности функционирующего микробного комплекса (табл. 3) (Sikora et al., 1994; Bouma, 1997; Doran, 2000; Benedetti, Dilly, 2006).

Наиболее высокие значения микробной биомассы отмечены в поверхностном слое болот: 5.44 мг/г – в Турочаке и 6.06 мг/г – в Кутюшском. С глубиной она снижается в 1.5–6 раз. Эта закономерность нарушается однажды в сентябре, когда в слое 25–50 см произошло увеличение биомассы в 2 раза. Отмечается снижение биомассы в июле и увеличение в сентябре. По погодным условиям сентябрь 2013 г. выделялся высокими температурами и осадками (на 4° С выше среднегодовой температуры и на 20 мм выше среднегодовой нормы осадков). Скорость базального дыхания микроорганизмов с глубиной изменяется незначительно. Таким образом, в поверхностных слоях трансформация органического вещества торфов протекает за счет деятельности аэробных микроорганизмов, а на глубине в процессах трансформации участвуют анаэробные и факультативно-анаэробные микроорганизмы. При увеличении мощности ТЗ окислительно-восстановительные условия на глубине смещаются в сторону преобладания анаэробных процессов, поэтому вниз по профилю происходит снижение микробной биомассы, в том числе и её активной части, определяемой методом СИД.

Значение QR, которое является критерием устойчивости микробных сообществ и индикатором

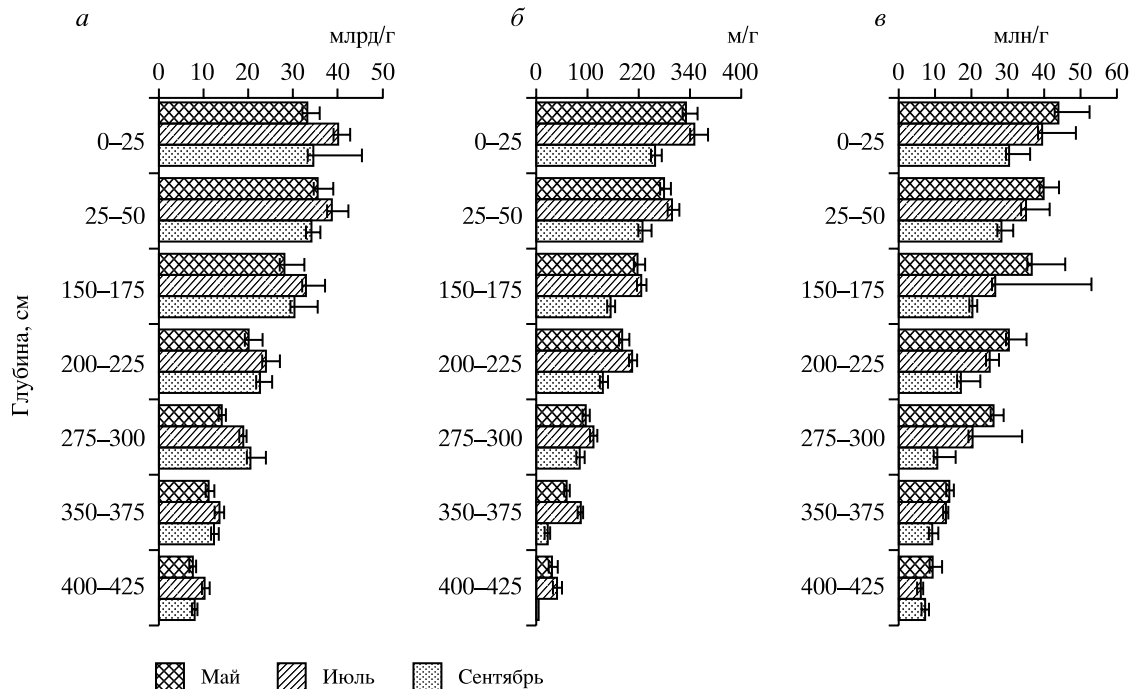


Рис. 3. Динамика численности микроорганизмов по профилю торфяной залежи: *а* – бактерий, *б* – грибного мицелия, *в* – спор грибов; болото Турочак, 2012 г.

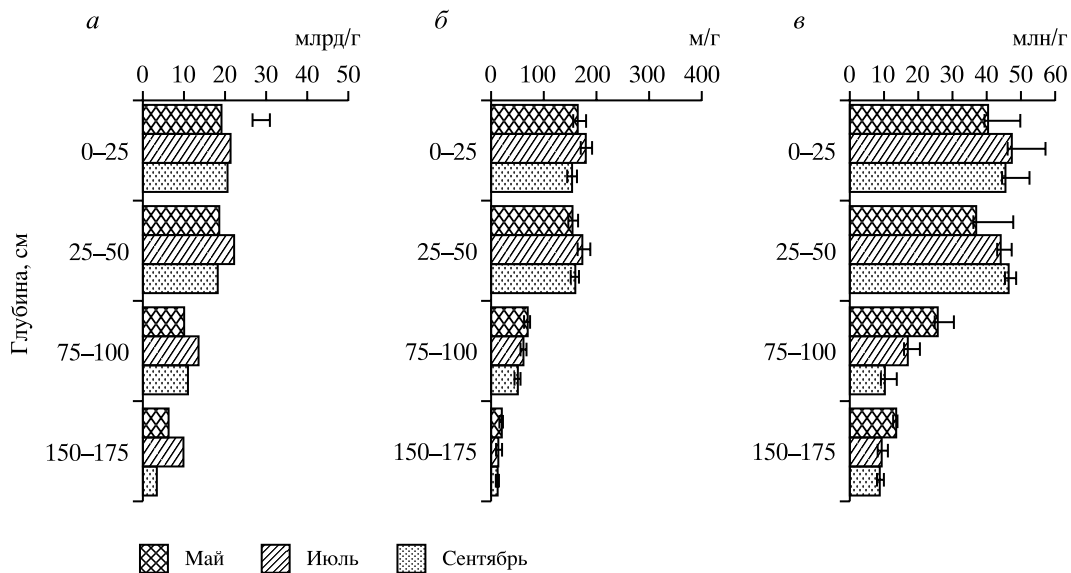


Рис. 4. Динамика численности микроорганизмов по профилю торфяной залежи: *а* – бактерий, *б* – грибного мицелия, *в* – спор грибов; болото Кутюшское, 2012 г.

эффективности использования субстрата (Anderson, Domsch, 1990), изменяется с глубиной. В целом для вегетационного периода 2013 г. оно не превышает величины 0.85, что характеризует стабильное функционирование микробных сообществ в исследуемых ТЗ. Отсутствие значительных различий величин QR может свидетельствовать об устойчивом протекании

микробных процессов, связанных с трансформацией углерода (Anderson, Domsch, 1993).

Микроорганизмы в ТЗ обнаружены по всему профилю, но их активность проявляется различно. Даже при переувлажнении или полном затоплении с поверхности, что наблюдается весной и в периоды выпадения обильных осадков,

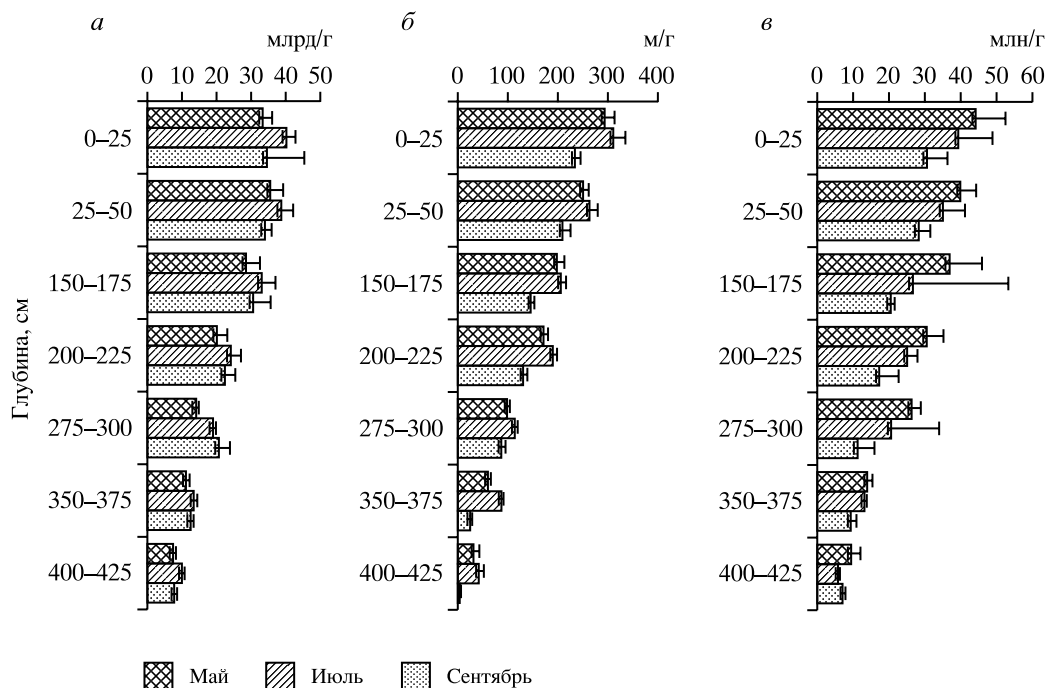


Рис. 5. Динамика численности микроорганизмов по профилю торфяной залежи: *a* – бактерий, *б* – грибного мицелия, *в* – спор грибов; болото Турочак, 2013 г.

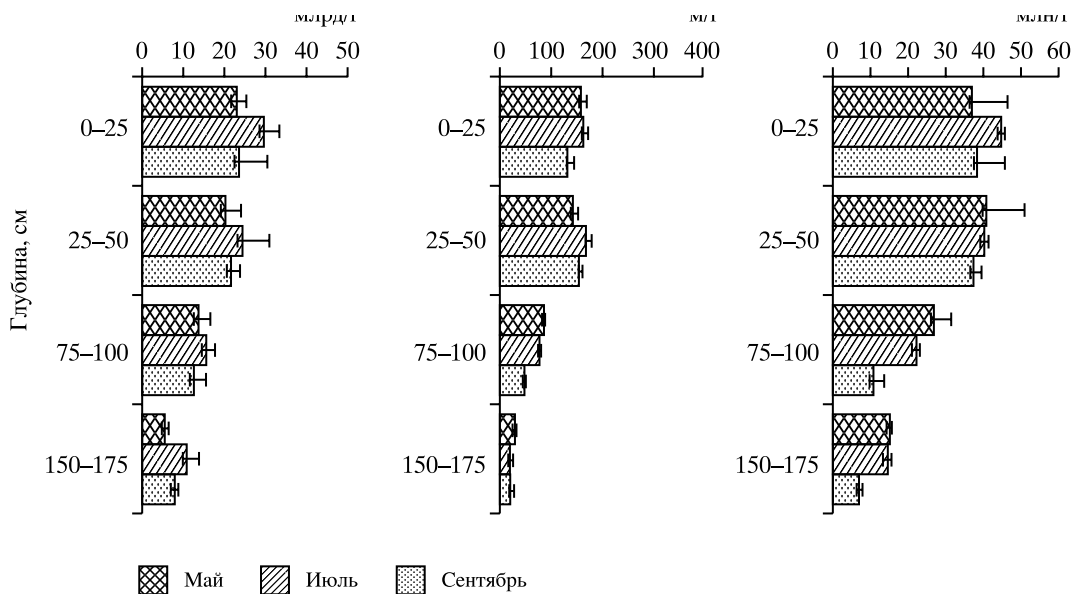


Рис. 6. Динамика численности микроорганизмов по профилю торфяной залежи: *a* – бактерий, *б* – грибного мицелия, *в* – спор грибов; болото Кутюшское, 2013 г.

биохимические процессы имеют место, несмотря на анаэробные условия. Это наблюдается и в эвтрофной (при мощности 2 м), и в мезотрофной (4.3 м) залежах.

Нельзя забывать и протекающие в ТЗ химические процессы. Как правило, биохимические и хи-

мические процессы взаимосвязаны между собой. Процессы переработки органического вещества микроорганизмами основываются на четком энергетическом фундаменте и наличии питательных элементов. Органическое вещество торфообразователей служит и пищей, и “топливом” для микробов. Окислительные реакции, протекающие

Таблица 3. Динамика активности микрофлоры за вегетационный период, 2013 г.

Глубина, см	БМ, мг/г с.т.	БД, мкг C-CO ₂ /(г × ч)	QR (БД/СИД)
Май			
0–25	4.29/6.06	4.00/1.38	0.35/0.20
25–50	3.89/1.54	2.33/1.13	0.20/0.75
150–175	1.58/1.39	2.11/1.79	0.47/0.71
400–425	1.76	1.20	0.24
Июль			
0–25	1.40/3.33	2.73/1.12	0.85/0.30
25–50	2.28/1.96	2.60/0.62	0.45/0.34
150–175	1.03/2.70	2.66/1.79	0.60/0.36
400–425	1.52	1.27	0.30
Сентябрь			
0–25	5.42/2.75	5.44/1.25	0.35/0.34
25–50	1.93/6.56	2.78/0.89	0.54/0.15
150–175	1.10/1.77	2.94/1.63	0.72/0.45
400–425	0.96	1.56	0.63

Примечание. БД – базальное дыхание; БМ – микробная биомасса; СИД – субстрат-индуцированное дыхание; QR – микробный метаболический коэффициент; с.т. – сухой торф; числитель – Турочак, знаменатель – Кутюшское.

Таблица 4. Эмиссия CO₂ и CH₄ на болотах Горного Алтая, мг/м²ч

Год	Месяц					
	май	июль	сентябрь	май	июль	сентябрь
	CO ₂			CH ₄		
Турочак						
2012	17.2±0.3	49.7±13.5	27±10.2	1.2±0.1	-1.6±0.8	–
2013	3.07±0.3	27.2±9.5	–	4.1±0.1	11.3±0.4	–
Кутюшское						
2012	93.2±8.4	74.8±6.5	34.9±3.7	2.9±1.8	0.6±0.2	0.5±0.1
2013	45.7±9.5	45.4±6.5	–	1.8±0.4	-1.4	–

Примечание. “ – “ измерение не проводилось, ± – доверительный интервал

при участии микроорганизмов и являющиеся обязательными в процессе образования торфов, снабжают энергией эндотермические реакции, текущие с помощью микробов, поэтому возможности превращений и их полнота возрастают в аэробных условиях. И как следует из наших исследований, отсутствие облигатно анаэробных условий способствует развитию процесса торфогенеза на любой глубине ТЗ, но превалирующее его направление – гумификация. В результате биохимических процессов происходит образование парниковых газов CH₄ и CO₂. Влияние этих газов на климат биосферы Земли вызывает споры

в научном мире (Карелин и др., 2013; Почикалов, Карелин, 2014).

Рассмотрим, в каких количествах выделяется CH₄ и CO₂ за вегетационные периоды двухлетнего мониторинга и как их динамика соответствует активности микробиологических процессов (табл. 4). По эмиссии газов выделяется мезотрофное болото Кутюшское, в котором самые высокие значения эмиссии CO₂ (до 93.2 мг/м²ч) и CH₄ (28.9 мг/м²ч). И если микробиологическая активность в сухой 2012 г. и влажный 2013 г. особо не различалась, то по активности эмиссии выделяется сухой год с наибольшими величинами эмиссии CO₂. Выделение

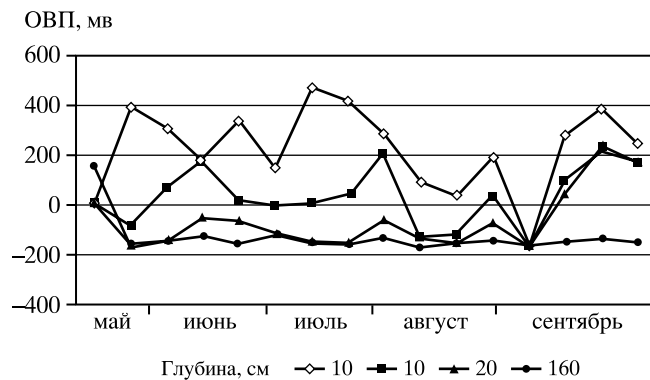


Рис. 7. Динамика окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в эвтрофном болоте Турочак, среднее за 2012–2013 гг., мВ.

метана в эвтрофном болоте в большем количестве отмечается во влажный год, в сухой год в июле происходило даже его поглощение ($-1.6 \text{ мг/м}^2\text{ч}$). Мезотрофное болото показало обратную закономерность: в большем количестве метан выделялся в сухой год, а во влажный 2013 г. его выделялось в 2 раза меньше, а в июле происходило его поглощение ($-1.4 \text{ мг/м}^2\text{ч}$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сложные и многоступенчатые процессы торфогенеза осуществляются различными группами микроорганизмов. Результаты свидетельствуют, что микробный гетеротрофный комплекс торфяных болот тесно связан с работой анаэробных микроорганизмов, осуществляющих различные биохимические процессы в ТЗ. Вместе с тем известно, что даже ограниченный доступ кислорода из атмосферы или от кислородсодержащих, главным образом, минеральных компонентов оказывает существенное влияние на интенсивность течения микробиологических процессов. Но отметим, что специфической особенностью водного режима ТЗ болотных экосистем является состояние затопления. Отсюда традиционно считается, что за пределами деятельного слоя (мощность деятельного слоя по К.Е. Иванову (1975) может приниматься равной расстоянию от поверхности болота до среднего многолетнего минимального уровня болотных вод, наблюдающегося в теплый сезон года) существует зона анаэробнозиса. Об этом же свидетельствует и динамика окислительно-восстановительного потенциала, которая из года в год показывает наличие таких анаэробных условий, если только не допустить, что имеющиеся методы измерения не соответствуют поставленной цели измерения окислительно-восстановительного потенциала в гетерогенной многофазной среде, какой

является ТЗ болота (рис. 7). Так, окислительные условия в ТЗ эвтрофного болота Турочак определяются в слое до 20 см, но при выпадении осадков резко снижаются до нулевой границы. Окислительно-восстановительный потенциал на глубине 20 см чаще имеет отрицательные значения, близкие к -200 мВ . Ниже по профилю потенциал еще более понижается. Таким образом, складывается впечатление, что окислительные условия поддерживаются только в слое у поверхности, а резко восстановительные – в нижней части ТЗ. Поэтому в зоне анаэробнозиса разложение органического вещества замедлено. Быстрое разложение растительных тканей на поверхности происходит в хороших аэробных условиях их первоначального превращения в торф. Когда же этот слой со временем оказывается на глубине (болото Турочак имеет возраст за 7 тыс. лет), биохимические процессы по превращению органического вещества протекают и далее, но их направление сдвигается в сторону гумификации, так как легкодоступного органического вещества уже нет. Это еще раз подчеркивает, что в глубине ТЗ вместо микробиологических процессов аэробного характера (в основном гидролиз) продолжают развиваться другие биохимические процессы, способствующие трансформации органических веществ в направлении гумификации. Процесс гумификации длительный и энергозатратный. И это также свидетельствует, что в ТЗ всегда присутствует свободный кислород, который поступает в нее, в том числе и в результате происходящих в ТЗ биохимических процессов. Надо полагать, ТЗ в своем составе практически всегда имеет газовую фазу, содержащую кроме углеродных парниковых газов (CO_2 , CH_4) свободный кислород. Например, приводятся данные, в которых обосновывается положение о содержании в ТЗ кислорода от 65–80 до 100–150 г/м^3 , или 5–11% по объему (Смагин, 2007). Возможно также, что активность микробиологических процессов поддерживает и наличие высоких концентраций ГК и ФК, так как микроорганизмы чрезвычайно чувствительны к биологически активным ингредиентам и добавкам, коими и являются эти кислоты и их соли. Развитие и рост микроорганизмов при стимулировании может возрастать на 300–400% (Раковский, Пигулевская, 1978).

Среди других факторов, подтверждающих образование кислорода в ТЗ, рассмотрим динамику каталазы (табл. 5). Под воздействием каталазы происходит расщепление перекиси водорода, образующейся в результате других реакций, на воду и свободный кислород, который и принимает участие в окислении органических соединений. Наличие каталазы также свидетельствует о

Таблица 5. Средние значения активности каталазы за вегетационные периоды, мл $\text{CO}_2/(\text{г} \times 2 \text{ мин})$

Слой, см	Каталаза					
	общая		неферментативная		ферментативная	
	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.
Турочак						
0–1	3.8	8.4	0.4	0.5	3.3	7.8
1–2	2.7	2.6	0.7	0.9	2.0	2.3
2–4	2.0	2.8	0.5	0.5	1.5	2.3
Кутюшское						
0–1	4.3	2.5	1.7	0.9	2.2	1.6
1–2	4.5	6.3	1.4	0.9	4.5	5.5

наличия кислорода в ТЗ болот. Общая активность каталазы в эвтрофном болоте невысокая, но она равномерно распределена в ТЗ с небольшим превышением в верхнем метровом слое. В торфяной залежи Кутюшского болота общая каталаза более активна в слое, прилегающем к подстиляющим грунтам. Общая каталазная активность включает в себя ферментативную и неферментативную активности. Неферментативная каталазная активность обусловлена катализаторами абиогенной природы, в частности, каталитической активностью минералов солей железа, марганца и мертвой органической части. Ферментативная каталазная активность осуществляется за счет ферментов биологического комплекса. В исследуемых типах болот преобладает ферментативная каталазная активность. В эвтрофной ТЗ ее активность снижается вниз по торфяному профилю, в мезотрофной – увеличивается.

Сравнительный анализ микробиологических и биохимических процессов в горноалтайских болотах с аналогичными типами болот юго-восточной части Западно-Сибирской низменности выявил значительно большую их активность в ТЗ Горно-Алтайских болот, результатом которой является и большее выделение CH_4 и CO_2 (Сергеева и др., 2013).

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы были выявлены особенности биохимического состава Горно-Алтайских болот и степень их участия в формировании эмиссии парниковых газов. Экстремальные средние значения эмиссии CO_2 в горных болотах варьируют от 3.07 до 93.2, CH_4 – от 1.6 до 11.3 $\text{мг/м}^2\text{ч}$.

Биохимические процессы разной направленности происходят в торфяном профиле вплоть до подстиляющих пород. Состав и степень проявления активности микробных комплексов в разных частях ТЗ различны. Процесс аэробного разложения наблюдается в верхней части профиля ТЗ. В нижнем слое ТЗ, прошедшем стадию болотообразования, происходит замедление и качественное изменение биохимических процессов. Степень биохимической активности определяется физическими свойствами и биохимическими процессами, в результате которых в ТЗ формируются локальные анаэробно-аэробные условия, свидетельствующие о наличии в затопленной ТЗ окислительных условий. Об этом же свидетельствует динамика каталазы, активность которой можно охарактеризовать как достаточно высокую.

Численность микроорганизмов постепенно убывает вниз по профилю, достигая своего минимума в подстиляющей породе. Длина мицелия, активного компонента грибного комплекса была значительно выше в ТЗ болота Турочак, чем в более бедном по содержанию элементов питания Кутюшском болоте.

Исследования не подтвердили четкой зависимости динамики биохимических процессов (а также и эмиссии парниковых газов) от погодных условий вегетационного периода, что позволяет предположить – это взаимовлияние накапливается в течение более продолжительного времени вследствие особых гидрофизических свойств горных торфяных болот, что необходимо учитывать при моделировании.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (Госзадание ТГПУ № 174), гранта РФФИ (№ 14–17–00038), а также в рамках Госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова, части 2 (№ 01 2011 554 19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н.Д.*, 2003. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука. 223 с.
- Базин Е.Т., Копенкин В.Д., Косов В.И., Корчунов С.С., Петрович ВМ.*, 1992. Технический анализ торфа. М.: Недра. 431 с.
- Бахнов В.К.*, 1986. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск: Наука. 192 с.
- Глебов Ф.З., Толейко Л.С., Климанов В.А., Карпенко Л.В., Даишкова И.С.*, 2000. Динамика палеорастительности, палеоклимата, накопления торфа и углерода в междуречье Оби и Васюгана (Западно-Сибирская низменность) // Динамика болотных экосистем Северной Евразии в голоцене. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН. С. 16–19.
- Головченко А.В., Волкова Е.М.*, 2006. Численность, запасы и структура микробных комплексов низинных торфяников Тульской области // Материалы пятой научной школы “Болота и биосфера” Томск: ЦНТИ. С. 158–162.
- Головченко А.В., Тихонова Е.Ю., Звягинцев Д.Г.*, 2007. Численность, биомасса, структура и активность микробных комплексов низинных и верховых торфяников // Микробиология. Т. 76. № 5. С. 711–719.
- Головченко А.В., Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г.*, 2008. Микробиологические основы оценки торфяника как профильного почвенного тела // Вестн. ТГПУ. Вып. 4 (78). С. 46–53.
- Дырин В.А., Красноженов Е.П.*, 2007. Активность микрофлоры в целинной и рекультивируемой торфяно-болотных почвах // Вестн. ТГПУ. Вып. 6. С. 33–38.
- Иванов К.Е.*, 1975. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеиздат. 280 с.
- Инишева Л.И., Ивлева С.Н., Щербакова Т.А.*, 2003. Руководство по определению ферментативной активности торфяных почв и торфов. Томск: Изд-во Том. ун-та. 122 с.
- Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В., Почикалов А.В., Краев Г.Н.*, 2013. Межгодовые изменения ФАР и влажности почвы в теплый сезон могут быть важнее для направления годового углеродного баланса в тундрах, чем колебания температуры // Журн. общ. биологии. Т. 74. № 1. С. 3–22.
- Методы почвенной микробиологии и биохимии, 1991 / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ. 303 с.
- Почикалов А.В., Карелин Д.В.*, 2014. Одногодичные наблюдения за разложением опада тундровых растений через потерю массы и эмиссию CO₂: роль биотических и абиотических факторов, сезонов года, биотопа и пространственно-временного масштаба // Журн. общ. биологии. Т. 75. № 3. С. 16–181.
- Раковский В.Е., Пигулевская Л.В.*, 1978. Химия и генезис торфа. М.: Недра. 231 с.
- Сергеева М.А., Порохина Е.В., Голубина О.А.*, 2013. Биологическая активность торфяной залежи болота Турочак // Вестн. ТГПУ. Вып. 8(136). С. 131–137.
- Смагин А.В.*, 2007. Почвенно-гидрофизическое обеспечение исследований газовой функции Западно-Сибирских болот в связи с проблемой парникового эффекта // Экол. вестн. Сев. Кавказа. Т. 3. № 3. С. 46–58.
- Тарко А.М.*, 2010. Математическая модель глобального цикла углерода в биосфере // Журн. общ. биологии. Т. 71. № 1. С. 97–109.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H.*, 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. V. 10. № 3. P. 314–322.
- Anderson T.H., Domsch K.H.*, 1990. Application of Eco-Physiological Quotients qCO₂ and qD on Microbial Biomass from Soils of Different Cropping Histories // Soil Biol. Biochem. V. 22. № 2. P. 251–255.
- Anderson T.H., Domsch K.H.*, 1993. The Metabolic Quotient for CO₂ (qCO₂) as a Specific of Environmental Conditions, such as pH, on the Microbial Biomass of Forest Soils // Soil Biol. Biochem. V. 25. P. 393–395.
- Benedetti A., Dilly O.*, 2006. Approaches to defining, monitoring, evaluating and managing soil quality // Microbiological Methods for Assessing Soil Quality/ Eds Bloem I., Hopkins D.W., Benedetty A. CABI. Walling-Ford. P. 3–14.
- Bouma J.*, 1997. Environmental quality: a European perspective // J. Environm. Quality. V. 26. P. 26–31.
- Doran J.W.*, 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality // Applied Soil Ecology. V.15. P. 3–15.
- Hansen J., Sato M., Kharecha P., Beerling D., Berner R., Masson-Delmotte V., Pagani M., Raymo M., Royer D.L., Zachos J.C.*, 2008. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? // Open Atmos. Sci. J. № 2. P. 217–231.

Sikora L.J., Yakovchenko V., Kaufman D.D., 1994. Comparison of rehydration method for biomass determination to fumigation-incubation and substrate-induced respiration method // *Soil Biol. Biochem.* V. 26. № 10. P. 1443–1445.

Tolonen K., Vassander H., Damman A.W.H., Climo R.S., 1992. Rate of apparent and true carbon

accumulation in boreal peatland // *Proceeding of 9 International Peat Congress.* Upsala. Sweden. V. 1. P. 319–333.

Vitt D.H., Beilman D.V., Halsey L.A., 2000. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene // *Canadian J. Earth Science.* № 37. P. 283–287.

Biochemical processes of greenhouse gasses generation in swamplands of the Gorny Altai

L. I. Inisheva¹, A. V. Golovchenko², G. V. Larina³

¹*Tomsk State Pedagogical University
634061 Tomsk, Kievskaya, 60
e-mail: inisheva@mail.ru*

²*M.V. Lomonosov Moscow State University
119991 Moscow, Leninskie Gory
e-mail: golovchenko.alla@gmail.com*

³*Gorno-Altai State University
649000 Gorno-Altai, Lenkina, 1
e-mail: gal29977787@yandex.ru*

Starting from 2009, monitoring studies of swamp regimes have been conducted at the swampland station located in the north-eastern Altai. Here, we present the results of biological activity (indices of microorganisms abundance, respirometric indicator, catalase) in peat deposits of eutrophic (Turochak) and mesotrophic (Kutyushskoye) swamps during 2012–2013 vegetation periods with different levels of marsh water and oxidation-reduction conditions.