

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ОЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА В ЗАСУШЛИВЫХ УСЛОВИЯХ

Порохина Е.В.<sup>1</sup>, Сергеева М.А.<sup>1</sup>, Дырин В.А.<sup>1</sup>, Маслов С.Г.<sup>2</sup>, Егорова А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный педагогический университет, Томск, e-mail: porohkatrin@yandex.ru;

<sup>2</sup>Институт природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, e-mail: maslovSG@tpu.ru

---

Торфяные болота – уникальные экосистемные образования биосферы: они способны чутко реагировать на изменения внешних условий. Есть данные, согласно которым в подзоне мелколиственных осиново-берёзовых лесов Западной Сибири трансгрессия болот из очагов заболачивания замедляется. В этой зоне можно отчетливо проследить влияние изменения климата на активность болотообразования, которое обусловлено рядом взаимосвязанных процессов, в первую очередь, гидротермических, микробиологических, биохимических. В работе приводятся результаты изучения динамики перечисленных процессов в олиготрофной торфяно-болотной экосистеме, находящейся на территории Томского района Томской области. Общая площадь болота – около 123 га; максимальная глубина торфяной залежи – 2,5–2,7 м. В течение вегетационного периода 2014 года здесь были проведены исследования разных режимов функционирования болота. Погодные условия периода наблюдений характеризовались как теплые и засушливые. Уровни болотных вод варьировали в диапазоне 10–40 см, глубина прогревания торфяной залежи до активных температур (до 10 °С и выше) составляла около 50 см. Окислительные условия отмечались только в поверхностном слое (0–20 см). В результате изучения в экосистеме режимов было показано, что в условиях сухого летнего периода 2014 г. происходила активизация микробиологических и биохимических процессов по всему профилю торфяной залежи и наиболее заметно – в слое 0–25 см. Очевидно, что и торфообразовательный процесс в указанный период протекал с наибольшей активностью на этой глубине.

---

Ключевые слова: торфяно-болотная экосистема, торфогенез, торфяная залежь, динамика процессов, гидротермический режим, окислительно-восстановительные условия, биохимический режим, газовый режим, эмиссия парниковых газов.

## FUNCTIONING OF THE OLIGOTROPHIC MIRES IN ARID CONDITIONS

Porokhina E.V.<sup>1</sup>, Sergeeva M.A.<sup>1</sup>, Dyrin V.A.<sup>1</sup>, Maslov S.G.<sup>2</sup>, Egorova A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State Pedagogical University, Tomsk, e-mail: porohkatrin@yandex.ru;

<sup>2</sup>Institute of Natural Resources of Polytechnical University, Tomsk, e-mail: maslovSG@tpu.ru

---

Mires resources are the unique ecosystem of the biosphere. They are very sensitive to changes of the external environment. Many authors have substantiated the position that paludification becomes more active due to global climate change. In the aspen-birch small-leaved forests subzone of Western Siberia transgression of the fen becomes slowly. In this zone we can clearly trace the influence of climate change on the example of activity of biochemical processes. Studies of the fen regimes were carried out on the peat-mire ecosystem of the oligotrophic genesis. This mire Gazoprovodnoe locates on the territory of Tomsk district of Tomsk region. The total area of the mire is approximately 123 hectares with a maximum depth of 2.5–2.7 m and belongs to the category of areas without flow. During the summer period of 2014 were conducted studies of the regimes of the mire. Weather conditions of the summer period was characterized as warm and dry. The range of the level marsh water ranged from 10 cm to 50 cm, depth of warming to summer temperatures (10 °C) in the peat deposit was about 50 cm, oxidation-reduction conditions in peat deposit observed in the surface layer 0–20 cm. Based on the study of biochemical processes (microbial biomass by direct method using fluorescent microscopy, enzymes) and their activity (gas regim, emissions of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) were obtained results, which show that in conditions of a dry summer period there is the activation of biochemical processes in oligotrophic peat deposits of mire throughout the profile of peat deposit. But the highest activity is in the layer 0–25 cm.

---

Keywords: peat-bog ecosystem, peat formation, peat deposit, the dynamics of the processes, hydrothermal regime, oxidation-reduction conditions, biochemical regim, gas regim, emissions of greenhouse gases.

Западно-Сибирская равнина представляет собой крупнейший торфяной регион мира с содержанием торфа около 40 % от общемировых запасов. Заболачивание территории

Западной Сибири в целом носит прогрессирующий характер. Последние 2000 лет оно происходит здесь со скоростью 92 км<sup>2</sup> в год. В подзоне мелколиственных осиново-берёзовых лесов Западной Сибири, где преобладают эвтрофные осоково-гипновые и травяные болота, трансгрессия болот из очагов заболачивания замедляется. Это связано с интенсивным разложением растительных остатков в условиях переменной увлажненности и повышенной теплообеспеченности, что характерно для последних десятилетий. Именно в этой зоне можно проследить влияние изменений климата на активность болотообразования, которая, в свою очередь, определяется интенсивностью взаимообуславливающих процессов (гидротермических, биохимических, микробиологических и других). В юго-восточной части Томского района Томской области, отличающейся относительно невысокой заболоченностью, есть небольшие по площади болота, наиболее подходящие для выяснения вопроса об активности указанных процессов.

### **Объекты и методы исследований**

Болото Газопроводное представляет собой выпуклое олиготрофное болото. Оно располагается в северобарабинском болотном округе подтаежных эвтрофных осоково-гипновых болот в сочетании с сосново-кустарничково-сфагновыми (по болотному районированию [1]) и относится к категории мелкоконтурных замкнутых (бессточных), с преимущественно атмосферным типом водно-минерального питания. Общая площадь болота в нулевых границах торфяной залежи – около 123 га, при ее максимальной глубине 2,5–2,7 м. Это характерный для междуречья Оби и Томи вариант рослого ряма, отличительной особенностью которого является абсолютная разновозрастность древостоя с нередким обособлением двух-трех поколений леса.

Исследуемые торфа относятся в основном к древесно-травяной и моховой группам верхового типа (табл.). С поверхности и до глубины 175 см торфяная залежь сложена верховыми торфами, которые далее сменяются на переходный и низинный. Степень разложения торфа варьирует от 20 до 50 %, зольность – в пределах 2,3–10,9 %. Мощность торфяной залежи – 3,25 м. Торфа являются среднекислыми и сильнокислыми (рН<sub>сол</sub> 2,2–3,6 ед.). Содержание водорастворимых и легкогидролизуемых веществ составляет 25,3–46,5 % и равномерно снижается с глубиной. Количество гуминовых кислот, напротив, увеличивается вниз по профилю, достигая максимальной величины (36,1 %) в придонном слое, сложенном низинным типом торфа. Содержание фульвокислот распределено по залежи неравномерно и варьирует в пределах 12,0–24,7 %.

## Характеристика общетехнических и химических свойств торфов болота Газопроводное

Глубина, см	Вид торфа	Степень разложения, %	Зольность, %	pH сол	Hг	S	Степень насыщенности основаниями, %	ВРВ+ЛГВ, %	ГК, %	ФК, %
					мг*экв/100г с.в.					
0-25	Комплексный-В	25	4,3	2,21	104,34	10,53	9,16	46,5	17,3	14,8
50-75	Сосново-сфагновый-В	20	3,1	2,3	102,85	12,50	10,84	34,6	21,5	23,2
100-125	Сосново-пушицевый-В	50	2,8	2,4	98,37	12,50	11,27	34,7	23,8	16,7
150-175	Комплексный-В	32	2,3	2,4	105,83	16,45	13,45	33,2	27,8	24,7
200-225	Травяно-гипновый-П	32	3,3	2,9	73,04	24,35	25,00	26,4	35,6	12,0
300-325	Осоковый-Н	30	10,9	3,6	79,00	38,18	32,58	25,3	36,1	22,0
325-350	Минеральный грунт	-	-	-	10,5	17,77	31,31	-	-	-

Примечание. Нг – гидролитическая кислотность, S – сумма поглощенных оснований, с.в. – сухого вещества, «-» – не определялось, В – верховой торф, П – переходный, Н – низинный торф, ВРВ – водорастворимые вещества, ЛГВ – легкогидролизуемые вещества, ГК – гуминовые кислоты, ФК – фульвокислоты, ОМ – органическая масса.

Для определения плотности снежного покрова использовался весовой снегомер (Р-43). По данным снегомерной съёмки выяснялись запасы воды в снеге. В период с апреля по сентябрь на болоте проводились наблюдения за уровнем болотных вод с периодичностью 1 раз в декаду. Температурный режим изучался с помощью стационарных датчиков «АБИ». Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) определялся платинированными электродами до глубины 2–3 м один раз в 10 дней [2].

Образцы торфов для биохимических и агрохимических анализов отбирались ежемесячно буром ТБГ-1, в соответствии с ботаническим составом, до минерального грунта [2]. Биомасса микроорганизмов изучалась прямым методом с использованием люминесцентной микроскопии. Препараты просматривались на люминесцентном микроскопе МИКМЕД-2 [3].

В качестве показателей ферментативной активности учитывались: активность каталазы – газометрическим методом в модификации Ю.В. Круглова и Л.Н. Пароменской; полифенолоксидазная активность (ПФО) и пероксидазная активность (ПДО) – методом Л.А. Карягиной и Н.А. Михайловской [4]. Измерения проводились в трех повторностях. Газовый режим изучался «реперс»-методом. Газовый состав анализировался на хроматографе «Кристалл-5000.1» по стандартной методике [5, 6]. Статистическая обработка полученных данных проведена с использованием программы Microsoft Excel (с доверительным интервалом 0,95).

## Результаты исследований

Вегетационный период 2014 года существенно отличался от предыдущих неравномерным выпадением осадков (судя по среднегодовым данным). Избыточное увлажнение наблюдалось в мае и июле (количество осадков составило в 2,1 и 1,2 раза больше нормы). В целом вегетационный период 2014 года можно охарактеризовать как теплый и засушливый (ГТК 0,74).

Мощность снежного покрова на болоте Газопроводное в среднем была равна 65 см, при экстремальных ее значениях 56–79 см; снегозапасы в среднем составили 139 мм. Динамика уровней болотных вод (УБВ) характеризовалась равномерным их снижением в течение всего срока наблюдений (УБВ изменялись в диапазоне от 10 до 40 см). К концу вегетационного периода УБВ снизились до 50 см от поверхности, что для болота олиготрофного типа не характерно и объясняется погодными условиями года.

Прогревание торфяной залежи (ТЗ) началось в конце мая. Активные температуры (10 °С и более) распространились вглубь залежи до глубины более 40 см и фиксировались на этой глубине в период с 10 августа по 20 сентября. Летние температуры (более 15 °С) наблюдались только в поверхностном слое залежи (0–5 см) с последней декады июня до конца августа, а на глубине 80 см и ниже по профилю температура в течение всего периода наблюдений не достигала 10 °С.

Высокие значения окислительно-восстановительного потенциала, характеризующие окислительные условия, отмечались в ТЗ на глубине до 40 см, а в глубже расположенных слоях поддерживались, преимущественно, восстановительные условия (0–100 мВ).

Ранее было установлено, что в торфяных болотах, в которых поддерживаются восстановительные условия на протяжении всего теплого периода, обитают различные группы микроорганизмов: бактерии, актиномицеты, грибы, являющиеся главными участниками торфообразовательного процесса [7]. Микроорганизмы являются основными продуцентами энзимов в почве, поэтому степень активности микрофлоры и ферментов в торфяной залежи отражает направленность торфообразовательного процесса [3, 8].

Результаты исследований показывают, что по всей ТЗ болота Газопроводное (до подстилающей породы) распространены бактерии, актиномицеты и споры грибов. Их содержание постепенно уменьшалось с глубиной. Грибной мицелий обнаруживался преимущественно в верхних слоях (до глубины 175 см) (рис. 1).

Содержание бактерий в среднем для вегетационного периода максимальных значений достигало в верхних слоях (15–30 млрд кл/г). В верхнем (0–25 см) и среднем (100–125 см) слоях торфяного профиля минимальная численность бактерий отмечалась в мае. Вероятно, весенние низкие температуры и обильные осадки подавляли развитие бактерий, особенно

аэрофилов. В слоях глубже 200 см четкой сезонной динамики выявить не удалось; при этом минимум бактериальных клеток фиксировался в сентябре.

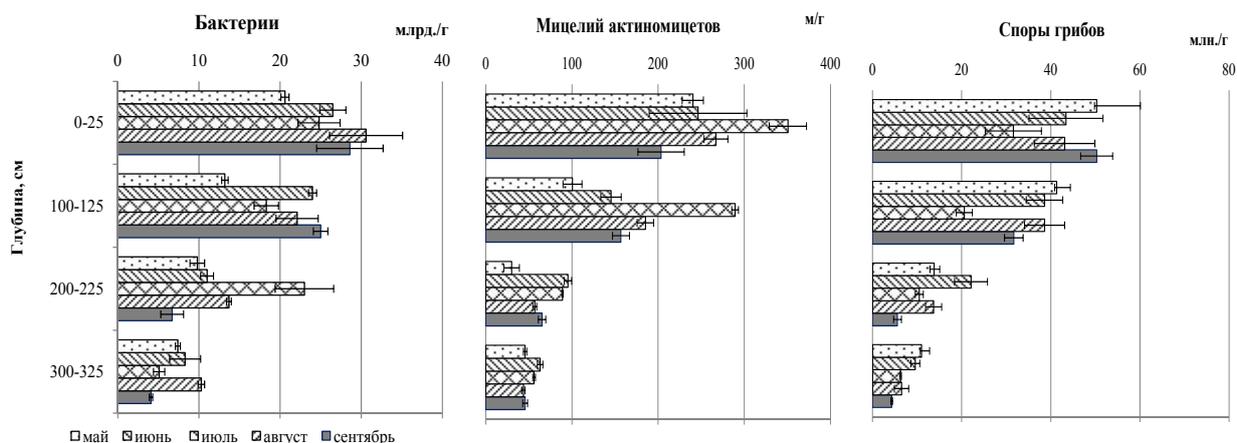


Рис. 1. Микробная биомасса в торфяной залежи болота Газопроводное

Длина актиномицетного мицелия изменялась от 30 до 350 тыс. м/г. В придонном горизонте (300–325 см) длина актиномицетного мицелия по месяцам практически не изменялась, в верхнем и среднем слоях максимум актиномицетов отмечался в июле, превышая весенние и осенние значения, в среднем, в 2 раза.

В грибной составляющей микробной биомассы на всех глубинах преобладали споры. Слабое развитие грибного мицелия на глубине ниже 200 см, вероятно, связано с изменением типа торфа – с верхового на переходный, и далее – на низинный. Аналогичные результаты были получены ранее для торфяных залежей олиготрофного типа. В поровом пространстве торфа низинного типа преобладают ультрамикropоры, размером менее 5 мкм, в которых развитие микроскопических грибов проблематично [9, 10].

Результаты наблюдений за динамикой ферментативной активности показали, что общая каталазная активность в условиях 2014 года в ТЗ изменялась от 0,51 до 7,32 мл O<sub>2</sub> / г \* 2 мин (далее – ед.) при среднем значении 1,83 ед. (рис. 2).

Наибольшей активностью фермента характеризовался верхний, хорошо аэрируемый слой 0–25 см, в котором отмечаются контрастные гидротермические условия. В сезонной динамике общей каталазной активности в верхних (0–75 см) и нижних (200–325 см) слоях ТЗ отчетливо отмечался майский максимум активности, когда наблюдались невысокие температуры в сочетании с повышенной влажностью.

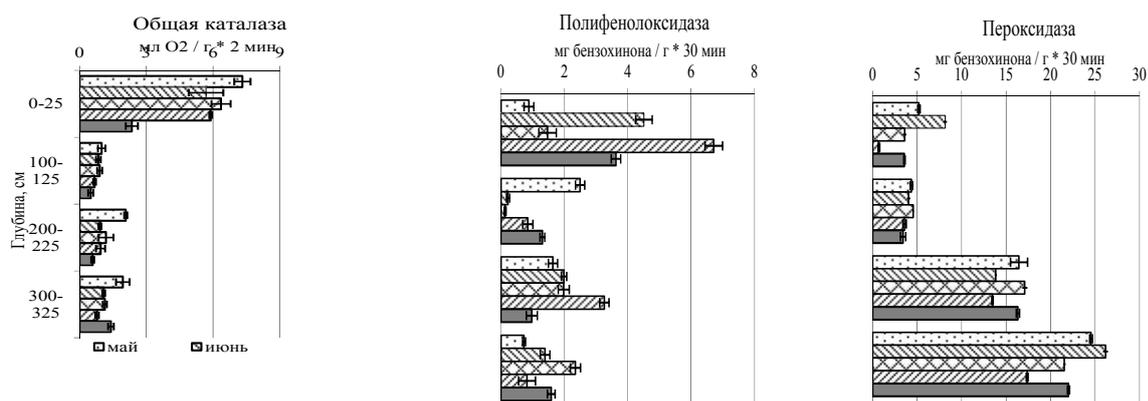


Рис. 2. Ферментативная активность в торфяной залежи болота Газопроводное

Активность полифеноксидазы изменялась в ТЗ в течение периода наблюдений в пределах 0,13–6,72 мг 1,4-бензохинона / г \* 30 мин (далее по тексту – ед.), при среднем значении 1,33 ед. Ранее исследователями экспериментально было доказано [9], что при увеличении аэрации активность ПФО возрастает. Результаты наших исследований показывают, что, как и в случае с каталазой, самые высокие показатели ПФО отмечались в верхнем, аэробном слое 0–25 см (рис. 2). Сезонная динамика активности ПФО в разных слоях залежи различалась. В верхнем слое (0–25 см) наибольшая активность фермента зафиксирована в сухие периоды (июнь, август). В средней части ТЗ (50-175 см) благоприятные условия для деятельности ПФО отмечались, преимущественно, в мае и сентябре, а в нижней (200-325 см) – в июле–августе.

Активность пероксидазы в ТЗ составила 0,69–26,19 мг 1,4-бензохинона / г\*30 мин (далее – ед.), при среднем значении 8,80 ед. Слой ТЗ мощностью 0–175 см характеризовался низкими показателями ПДО (не превышающими 8,16 ед.). В более глубоких слоях с восстановительными условиями и более низкой температурой, активность ПДО возрастала в 3–5 раз, по сравнению с верхними горизонтами.

Исследование газового режима в ТЗ болота Газопроводное показывает, что в период наблюдений происходило увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  с глубиной (рис. 3). Концентрация  $\text{CH}_4$ , в среднем за летний период, составила 0,10 ммоль/л. Сезонная динамика метана в верхнем (0–25 см) и глубже расположенных слоях различалась. Максимальные значения  $\text{CH}_4$  на всех исследуемых глубинах ТЗ зафиксированы в мае, но в последующие месяцы изменения по глубинам были не одинаковы. В аэробном слое концентрация метана в июне снизилась в 8 раз и не изменялась в последующие месяцы. В слое 125 см концентрация

метана, близкая к весенним значениям, отмечалась в июле и августе. В слоях глубже 200 см в летний период концентрация метана снизилась примерно в 1,5–2 раза.

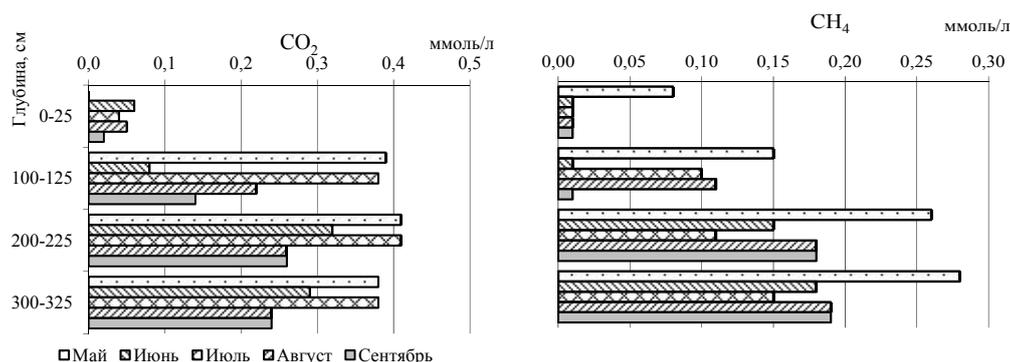


Рис. 3. Изменение концентрации CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> в торфяной залежи болота Газопроводное

Высокая концентрация CH<sub>4</sub> в мае в верхних слоях ТЗ могла быть связана с обильными осадками и, как следствие, высоким УБВ. Ухудшение аэрации могло привести к повышению активности метаногенных микроорганизмов, и снижению активности метанотрофных.

Концентрация CO<sub>2</sub> в залежи, в среднем за летний период, составила 0,24 ммоль/л (пределы – 0,00–0,41 ммоль/л). Минимальные значения отмечались в верхнем слое 0–25 см (0,00–0,06 ммоль/л). Увеличение концентрации CO<sub>2</sub> с глубиной совпадает с увеличением концентрации CH<sub>4</sub> и с активностью ПДО, но противоположно каталазной и полифенолоксидазной активности, а также общему содержанию микроорганизмов, численность которых с глубиной падает. Очевидно, что в нижней части ТЗ микробиологические и биохимические процессы протекают относительно активно, но с участием специфической микрофлоры (отличной от микрофлоры верхних, аэробных, слоев).

Анализ сезонной динамики показал, что, начиная с глубины 100–125 см, наиболее высокая концентрация CO<sub>2</sub> отмечалась в мае и июле.

### Выводы

1. Динамика гидротермического и окислительно-восстановительного режимов болота Газопроводное в условиях теплого и засушливого вегетационного периода 2014 г. характеризовалась следующими параметрами: уровни болотных вод варьировали в диапазоне 10–40 см, глубина прогревания торфяной залежи до активных температур (10 °С и выше) составляла около 50 см. Окислительные условия отмечались только в поверхностном слое (0–20 см).
2. Наибольшее количество микроорганизмов отмечалось в верхних слоях ТЗ болота. В структуре микробной биомассы преобладала бактериальная составляющая. Грибной компонент в верхних слоях залежи был представлен мицелием и спорами, в нижних –

преимущественно спорами. Сезонная динамика наиболее заметно проявлялась в верхних слоях залежи, подверженных воздействиям гидротермических условий окружающей среды.

3. Окислительно-восстановительные процессы, регулируемые каталазой и полифенолоксидой, наиболее интенсивно протекали в верхнем, аэробном слое (0–25 см) ТЗ. Нижняя часть ТЗ (глубже 175 см) отличалась высокой активностью пероксидазы.

4. Интенсивность образования диоксида углерода и метана увеличивалась с глубиной, наиболее активное образование  $\text{CH}_4$  фиксировалось в мае, августе и сентябре,  $\text{CO}_2$  – в мае и июле.

5. Анализ результатов режимных исследований показывает, что в условиях сухого летнего периода происходит активизация биохимических процессов по всей ТЗ олиготрофного болота, но наибольшая активность проявляется в слое 0–25 см.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (госзадание ТГПУ № 5.7004.2017/БЧ).*

### Список литературы

1. Болотные системы и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов и др. – М., 2001. – 584 с.
2. Инишева Л.И. Болотообразовательный процесс. Проведение полевых исследований на болотных стационарах / Л.И. Инишева, О.А. Голубина. – Томск: Изд-во ТГПУ, 2010. – 67 с.
3. Структура микробных сообществ верховых и низинных торфяников Томской области / Т.Г. Добровольская [и др.] // Почвоведение. – 2012. – № 3. – С. 317–326.
4. Инишева Л.И. Руководство по определению ферментативной активности торфяных почв и торфов / Л.И. Инишева, С.Н. Ивлева, Т.А. Щербакова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 122 с.
5. Steinmann Ph., Shotyk W. Sampling anoxic pore water in peatlands using "peepers" for in situ-filtration. Fresenius J. Anal. Chem., 1996, pp. 709–713.
6. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности / А.В. Наумов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 208 с.
7. Болотные стационары Томского государственного педагогического университета : коллективная монография / Л.И. Инишева, В.Ю. Виноградов, О.А. Голубина [и др.]. – Томск: ТГПУ, 2010. – 148 с.
8. Инишева Л.И. Биохимические процессы образования парниковых газов в болотах Горного Алтая / Л.И. Инишева, А.В. Головченко, Г.В. Ларина // Журнал общей биологии. – 2016. – Т. 77. – № 4. – С. 92–104.

9.      Функционирование микробных комплексов в верховых торфяниках – анализ причин медленной деструкции торфа / отв. ред. И.Ю. Чернов. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. – 128 с.
10.     Головченко А.В. Микробиологические основы оценки торфяника как профильного почвенного тела / А.В. Головченко, Т.Г. Добровольская, Д.Г. Звягинцев // Вестник ТГПУ. – 2008. – Вып. 4 (78). – С. 46-53.