

УДК 581:[252.62+574.2]/[58.032+58.036]*571.1

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОЦЕССА ТОРФООБРАЗОВАНИЯ В ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2019 г. И. А. Юсупов^a, *, Н. К. Панова^a, Т. Г. Антипина^a

^aБотанический сад УрО РАН, Россия, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а

*e-mail: iausupov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2017 г.

После доработки 01.03.2018 г.

Принята к публикации 19.03.2018 г.

Исследовали верхний слой торфяной залежи, сформировавшийся в градиенте более чем 20-летнего воздействия газового факела на олиготрофном болоте в Западной Сибири. В зоне влияния факела зафиксированы изменения температурных параметров приземного воздуха и корнеобитаемого горизонта торфа, увеличение степени разложения и зольности, понижение уровня болотных вод и кислотности верхнего слоя торфяной залежи. Показана взаимосвязь изменений гидрологического и температурного режимов с изменением состава и свойств торфа. По результатам ботанического и спорово-пыльцевого анализов выявлена тенденция возвратного развития верхнего депонируемого горизонта олиготрофной торфяной залежи в сторону эвтрофикации: смена фускум-торфа мохово-кустарничковым.

Ключевые слова: олиготрофное болото, физико-химические параметры торфа, ботанический состав торфа, палинологический анализ, уровень болотных вод, тепловое излучение газового факела, Западная Сибирь

DOI: 10.1134/S0367059718060148

Основное условие торфообразования — застойный водный режим. Решающее влияние на состояние “лесоболотных биогеоценозов” оказывает уровень болотных вод (УБВ) и режим водоснабжения корнеобитаемого горизонта [1] на глубине до 0.3 м [2]. Изменение гидротермического режима влияет на прирост мхов [3], биологическую продуктивность болотных биогеоценозов, торфообразование [4–6] и структуру торфяника [7].

Проблема прогнозирования состояния торфяных болот актуальна в связи с наблюдаемыми в последние десятилетия изменениями климата, которые связывают с увеличением содержания парниковых газов в атмосфере [8]. Болота влияют на состав воздуха, накапливая в депонируемом торфе органический углерод и выделяя углеродсодержащие газы CO_2 и CH_4 [9–11]. Баланс между этими процессами во многом определяется типом болотной экосистемы и ботаническим составом торфа [12].

На территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югра (Западная Сибирь) функционирует большое количество факельных установок, на которых ежегодно сжигается 3–6 млрд м³ попутного нефтяного газа, что составляет 10–25% от его добычи [13]. Большие объемы продуктов

сжигания, поступающие в атмосферу, могут дополнительно изменить ее газовый состав. На локальном уровне может иметь значение тепловое воздействие факела на компоненты экосистем. Тепловые потоки зависят от скорости и направления ветра, а также от температуры и относительной влажности воздуха [14, 15]. Кроме того, наблюдается аддитивный эффект обычной солнечной радиации [15, 16].

Реакция растительности на многолетнее тепловое воздействие факела сжигания нефтяного газа может рассматриваться как модель ее трансформации в условиях глобального потепления [17, 18]. Исходя из того, что содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе вокруг факела остается стабильным на расстоянии до 500 м [19], действие его теплового излучения можно считать одним из основных факторов, влияющих на скорость роста сосны [18]. На различном удалении от факела происходит существенная трансформация нижних ярусов лесоболотных растительных сообществ. В частности, в зоне теплового влияния факела на верховом болоте (сосняк сфагново-кустарничковый) наблюдается уменьшение проективного покрытия мохово-лишайникового покрова, высоты *Rubus chamaemorus* L. и

площади листьев вересковых кустарничков, а проективное покрытие травяно-кустарничкового покрова, высота сфагновых мхов, рост *Vaccinium uliginosum* L. и растений рода *Oxycoccus* Hill увеличиваются [20]. В сосняке лишайниковом повышение температуры также приводит к росту высоты и проективного покрытия брусники, доминанты травяно-кустарничкового яруса, увеличению мохового покрова (*Polytrichum juniperinum* Hedw.) и уменьшению мощности и проективного покрытия лишайников [17]. При тепловом воздействии факела не только усиливается интенсивность биологического круговорота углерода, но также наблюдается дополнительное связывание CO_2 в растениях и его накопление в устойчивом пуле почвы [21].

Цель данной работы — оценка роли газового факела в трансформировании процесса торфообразования в олиготрофном болоте. В задачи исследований входило изучение показателей предполагаемых основных факторов, определяющих процесс торфообразования в зоне влияния факела: УБВ, температура воздуха (на высоте 1.3 м) и корнеобитаемого горизонта торфа (на глубине 0.1 м). В качестве индикаторов изменения процесса торфообразования рассматривали ботанический состав, спорово-пыльцевые спектры (СПС) и некоторые физико-химические параметры торфа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Согласно физико-географическому районированию Тюменской области, район исследования относится к Вахской провинции лесной равнинной широтно-зональной области среднетаежной подзоны [22]. По торфяно-болотному районированию он находится на границе двух областей: Средне-Обской и Тым-Вахской [7] на правобережье р. Оби. Основу растительного покрова подзоны составляют леса и сфагновые болота верхового типа. Лесная растительность представлена сосновыми, елово-кедровыми лесами и производными сообществами на их месте, которые занимают наиболее дренируемые участки; плоские водоразделы обычно заболочены [23]. Климат района континентальный, холодный и влажный с преобладанием осадков в летний период.

Исследования проводили на территории, прилегающей к факельной установке (эксплуатируется с 1983 г.) на юго-восточной части Самотлорского месторождения нефти (рис. 1), на расстоянии 11 км в северном направлении от г. Нижневартовска (61°02'27" с.ш., 76°45'12" в.д.). По данным Нижневартовской метеостанции, среднегодовая температура за 1964–1983 гг. (20 лет до строительства факела) составляла $-2.96 \pm 0.32^\circ\text{C}$ (здесь и далее $m \pm SE$, $n = 20$), а в 1984–2006 гг. (22 года после строительства) $-2.03 \pm 0.21^\circ\text{C}$. Повышение среднегодовой температуры составило 0.93°C ($t_{\text{St}}(42) =$

$= 2.42$, $p = 0.020$), а средняя температура вегетационного периода (май–август) за 1984–2006 гг. оказалась выше, чем за 1964–1983 гг. ($t_{\text{St}}(42) = 3.30$, $p = 0.002$), на 1.1°C . Среднегодовое количество осадков в рассматриваемые периоды не изменилось (551.5 ± 17.4 мм в 1965–1983 гг. и 530.5 ± 20.5 мм — в 1984–2006 гг.), различия незначимы ($t_{\text{St}}(42) = 3.30$, $p = 0.510$).

Пробная площадь (ПП) была заложена на олиготрофном болоте озерково-грядово-мочажинного типа, на месторождении торфа “Самотлорское”, сформировавшемся на I–II надпойменных террасах р. Оби. Мощность торфяной залежи на месторождении местами достигает 5.0 м, а на ПП составляет от 1.8 до 2.0 м. Местами (на грядах) на глубине 0.3–0.4 м в июле встречаются линзы льда. ПП заложена в соответствии с требованиями ОСТ 56-69-83 [24] методом пунктирной трансекты на расстоянии 200 м в северо-восточном направлении от факела и имеет общую протяженность 100 м. Она состоит из 5 (I–V) прямоугольных секций (20×20 м), пронумерованных в направлении удаления от факела.

Основание факельной установки находится в центре искусственной котловины круглой формы, на 1.8–1.9 м ниже линии бровки (поверхности торфяной залежи). При строительстве на площадке были проведены вскрышные работы по частичной выемке и перемещению верхних горизонтов торфяной залежи на расстояние до 40–50 м от центра котловины. В последующие годы торф выгорел на площадке радиусом до 70 м от факела. Для предотвращения повторных возгораний на территорию был завезен песок. Верхний слой песчаного покрова является источником пыли, которая поднимается в воздух при частых шквалистых ветрах, а также вихревыми потоками воздуха, образующимися горящим газом. Фронтальный к факелу визир I секции удален от линии бровки на 130 м. На некоторых участках бровки сохранились обрывистые (более 40°) обнажения торфяного профиля высотой до 1.2 м, зарастающие древесной, кустарничковой и мохово-лишайниковой растительностью. На протяжении 3–4 м от бровки торфяная залежь подверглась усадке, а на поверхности наблюдаются следы длительного и глубокого высыхания (растрескивание). На расстоянии 80–100 м от внешней границы V секции на поверхности торфяной залежи проложены нефтепроводы диаметром 1020 мм.

УБВ измеряли на временных скважинах, обору́дованных на грядах в центрах секций. Дистанции между ними составляют 20 ± 1 м. Нивелирование IV класса проведено согласно требованиям [25] с использованием оптического нивелира CST/Berger, модель SAL 24 (точность измерения превышения 2.0 мм). Применяли Балтийскую систему высот. Измерения УБВ проводили в 2005 г.

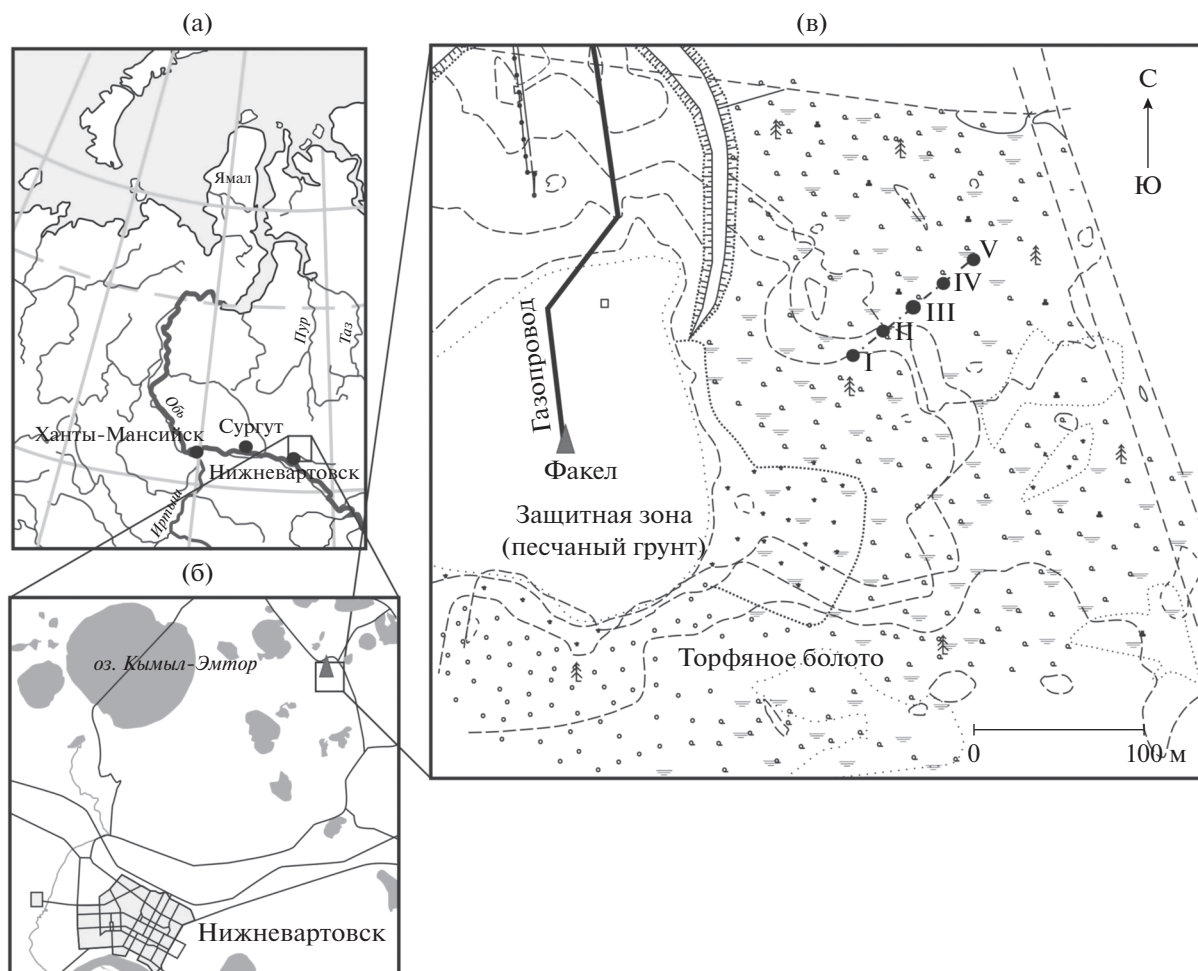


Рис. 1. Карта-схема района исследований: а – карта Западной Сибири; б – схема местоположения торфяного болота; в – схема расположения ПП. Здесь и на других рисунках I–V – номера секций.

(25 августа и 22 сентября) и 2011 г. (10 июля и 14 августа). Для статистической оценки разницы УБВ по сезонам наблюдений использовали W-критерий Вилкоксона.

Температуру воздуха и торфа измеряли даталоггерами НОВО компании “Onset Computer Corporation” (США), которые устанавливали в центре каждой секции по 2 шт.: на противоположной от источника тепла (восточной) стороне стволов деревьев (на высоте 1.3 м) и в торфе (на глубине 0.1 м). Продолжительность экспозиции – с 25.07.2006 до 23.07.2007, периодичность измерений – один раз в час с точностью 0.01°C. Динамику температурных полей приземного слоя воздуха и корнеобитаемого горизонта торфа рассматривали на основе их измерений за июнь и июль. В июне происходит преодоление физиологически активного порога +5°C, а в июле достигается максимальный прогрев. При анализе кривых среднесуточной температуры по секциям за пе-

риод май–июль использовано сглаживание по 5 точкам.

Отбор образцов торфа для анализов произведен в августе 2006 г. на грядах из шурфов, которые были заложены на дистанциях 210, 230, 254, 277 и 295 м от факела на I–V секциях соответственно. Из каждого шурфа отобрано по 5 проб сплошной колонкой по 2 см на глубину до 10 см от поверхности торфяной залежи. Физико-химический и ботанический анализы торфа проведены по стандартам (ГОСТ): ботанический состав – 28245-89; зольность и влажность – 26801-86; степень разложения торфа – 10650-72; обменная кислотность – 11623-65. Палинологический анализ выполнен по общепринятой методике [26].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На грядах обследованного торфяного болота произрастает абсолютно разновозрастный (21–200 лет), густой и смешанный древостой из сосны

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоя ПП по секциям (на 1 га)

Номер секции	Дистанция от факела, м	Относительная полнота	Порода	Средние		Запас, м ³	Густота, шт.
				высота, м	диаметр, см		
I	210	0.96	9.2С	1.9	3.7	9.0	9360
			0.8К	2.2	3.9	0.8	860
II	230	0.85	9.4С	1.8	3.1	8.4	10900
			0.6К	1.7	3.1	0.5	12610
III	250	0.92	9.6С	1.8	3.5	9.6	9880
			0.4К	1.6	3.1	0.3	930
IV	275	0.89	9.2С	1.4	2.2	5.3	20580
			0.8К	1.3	2.8	0.5	1700
V	295	0.64	8.9С	1.5	2.7	3.6	9500
			1.1К	1.4	2.8	0.4	1570

Примечание. Дистанции от факела приведены от середины секций; С – сосна обыкновенная, К – сосна сибирская.

обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с примесью сосны сибирской (*P. sibirica* DuRoi): бонитет V^б, тип леса – сосняк кустарничково-сфагновый (табл. 1). По периметру искусственного котлована, на опушке, в условиях прямого теплового воздействия произрастают карликовая береза (*Betula nana* L.) и единичные особи деревьев мелколиственных пород – березы (*B. pubescens* Ehrh.) и осины (*Populus tremula* L.). С удалением от факела их встречаемость снижается, а на расстоянии 180–200 м эти виды деревьев отсутствуют. Согласно геоботаническому исследованию [20], в живом напочвенном покрове на грядах преобладают кустарнички: *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne caliculata* (L.) Moench, *Andromeda polyfolia* L., *Vaccinium uliginosum* L., *V. vitis-idaea* L., встречаются *Oxycoccus palustris* Pers. и *O. microcarpus* Turcz. ex Rupr., местами – *Rubus chamaemorus* L., *Drosera rotundifolia* L., в моховом ярусе – сфагновые и зеленые

мхи. В мочажинах преобладают сфагновые мхи, встречается *Drosera anglica* Huds. Флористический состав травяно-кустарничкового яруса бедный, включает 12 видов высших сосудистых растений, принадлежащих к семействам Ericaceae, Rosaceae, Droseraceae и Cyperaceae. Лишайниковый покров сформирован представителями разных видов рода *Cladonia*.

В течение всего периода наблюдений обводненность торфяной залежи с удалением от факела постепенно повышалась и достигала максимума на III секции (рис. 2), на дистанции 250 м (170 м от границы торфяной залежи). В 2005 г. на I секции УБВ был ниже, чем на III, – на 17.3 см в августе и 14.3 см в сентябре; на IV и V секциях он был ниже на 3–4 см, чем на III, что может быть обусловлено различиями в микрорельефе. С началом осени наблюдалось повышение уровня воды в среднем на 7.9 ± 1.3 см ($n = 5$) по сравнению с концом летнего периода, а описанные выше различия УБВ между секциями сохранялись. Наблюдения в 2011 г. показали такие же закономерности. При парном сравнении УБВ в разные месяцы 2005 и 2011 гг. по W-критерию Вилкоксона установлено, что измеренные повторности показателей различаются статистически значимо ($p = 0.043$, $n = 5$).

Среднегодовая температура воздуха на I секции была выше, чем на остальных, на 0.2–0.5°C (табл. 2), а на III – самая низкая. В то же время ее значение на секциях IV и V оказалось немного выше, чем на III. По-видимому, на IV секции в утренние часы и до полудня на даталоггер попадали прямые лучи солнца, а на V воздух дополнительно прогревался от трассы нефтепровода, которая протекает на расстоянии 80 м. С увеличением дистанции от факела среднегодовая температура торфа на глубине 0.1 м имеет тенденцию к снижению. Приведенные данные свидетельствуют о

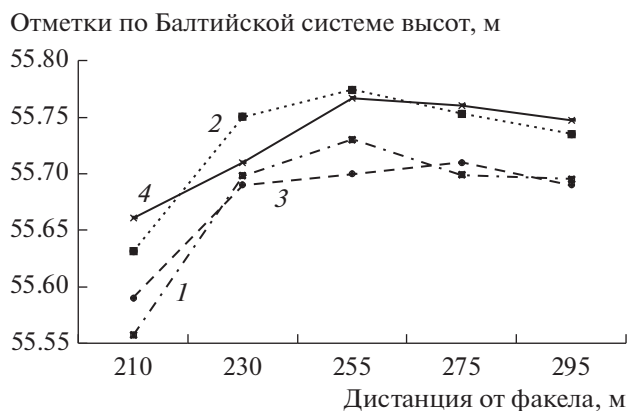


Рис. 2. Сезонные изменения УБВ на различных дистанциях от факела: 1 – 25.08.2005; 2 – 22.09.2005; 3 – 10.07.2011; 4 – 14.08.2011.

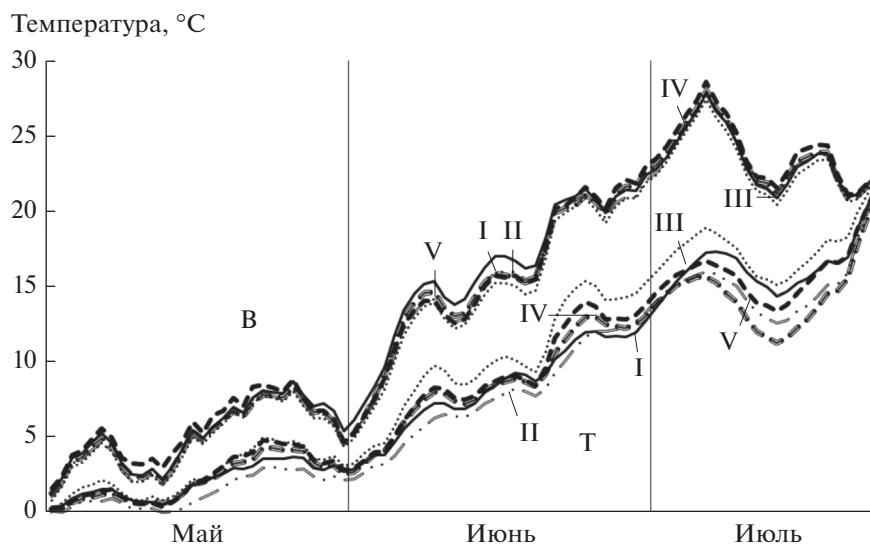


Рис. 3. Среднесуточная температура воздуха на высоте 1.3 м (В) и торфа на глубине 0.1 м (Т) на секциях в мае–июле 2007 г.

влиянии факела на температуру воздуха и торфа на секциях.

Анализ результатов измерения температуры воздуха и торфа вдоль трансекты показал, что в течение года наблюдается нестабильный градиент, однако проявляются определенные закономерности. Тепловое влияние факела заметно с 25 мая по 24 июня, когда на I секции температура приземного слоя воздуха была более чем на 1°C выше, чем на остальных. На III секции с начала апреля и до конца июля наблюдалась минимальная среднесуточная температура. В июле температура воздуха между секциями отличалась незначительно, а в конце вегетационного периода различия полностью нивелировались.

В динамике температуры воздуха и торфа наблюдаются существенные отличия. Со второй декады мая и до конца июня температура торфа на I и II секциях была ниже, чем на остальных, в то же время корнеобитаемый горизонт на I секции прогревался лучше, чем на II, по-видимому, от факела. С третьей декады апреля и в последующие месяцы на III секции наблюдается более высокая среднесуточная температура, чем на остальных. Определены дни перехода среднесуточной температуры торфа через физиологически активный порог $+5^{\circ}\text{C}$: 4 июня – на секциях III–V; 5 июня – на I; 6 июня – на II (рис. 3). Таким образом, в первую очередь температурный порог преодолевается на секциях с высоким, а через 2–3 дня с низким УБВ.

Возраст отобранных образцов торфа определяли на основании анализа данных авторов различных публикаций [27–29] о линейном приращении торфяной залежи в олиготрофных болотах

таежной зоны. Средний годовой прирост в субатлантический период составляет 0.4–1.0 мм, а за последнюю тысячу лет скорость накопления торфа на поверхности залежи увеличивается от 1 до 7 мм в год. При определении возраста дерновинки олиготрофного мха *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Н. Klinggr. по его годовичному приросту на верховых болотах Западной Сибири выявлено, что в верхней ненарушенной части моховая подушка прирастает примерно на 1 см в год, а возраст слоя 15–20 см составлял 26 лет. На глубине 30–35 см растительные остатки подвергаются значительному разложению, торфяная масса приобретает горизонтальную слоистость, и прирост составляет около 0.5–0.6 см в год. Исследованные нами образцы состояли в основном из слаборазложившихся остатков *S. fuscum*. Верхние 4 см торфа были более рыхлыми, а ниже в залежи отмечена горизонтальная слоистость. Таким образом, можно предположить, что ежегодный прирост торфа в исследованном горизонте составлял не менее 0.5 см, а возраст образцов до глубины 10 см не превышает 23 года, т.е. изученные нами изменения показателей происходили в период функционирования факела.

Степень разложения торфа на первых двух секциях увеличивается от верхнего слоя к нижнему и на глубине 8–10 см на I секции достигает 40% (табл. 3). По мере удаления от факела ее значение снижается и уже на III секции (дистанция 250 м) соответствует показателям, характерным для олиготрофного сфагнового торфа – от <5 до 10.0% [23]. Зольность торфа на всех секциях возрастает от нижних слоев к поверхности залежи, а на I в целом заметно выше, чем на других. Обменная кислотность исследованных слоев торфа во

Таблица 2. Среднегодовые (август 2006 г.—июль 2007 г.) и среднедекадные (за июнь—июль 2007 г.) температуры воздуха и торфа на секциях

№ секции	Воздух			Торф		
	$\bar{x} \pm m_{\bar{x}}$	доверительный интервал для $\bar{x}$		$\bar{x} \pm m_{\bar{x}}$	доверительный интервал для $\bar{x}$	
		–0.95%	+0.95%		–0.95%	+0.95%
Среднегодовые						
I	0.34 ± 0.77	–1.18	1.86	3.21 ± 0.36	2.50	3.92
II	-0.04 ± 0.77	–1.56	1.47	3.44 ± 0.33	2.80	4.09
III	-0.13 ± 0.77	–1.64	1.38	3.26 ± 0.41	2.45	4.07
IV	0.26 ± 0.77	–1.24	1.77	3.23 ± 0.37	2.50	3.95
V	0.19 ± 0.78	–1.34	1.71	2.79 ± 0.37	2.08	3.51
I декада июня						
I	10.88 ± 1.31	7.90	13.85	4.78 ± 0.62	3.39	6.18
II	9.78 ± 1.27	6.92	12.65	3.91 ± 0.54	2.69	5.12
III	9.44 ± 1.27	6.57	12.32	6.02 ± 0.87	4.04	7.99
IV	9.90 ± 1.27	7.02	12.78	5.22 ± 0.73	3.57	6.88
V	10.17 ± 1.37	7.08	13.26	5.04 ± 0.74	3.37	6.71
II декада июня						
I	15.47 ± 1.08	13.03	17.92	8.07 ± 0.52	6.90	9.25
II	14.42 ± 1.14	11.84	17.00	7.26 ± 0.42	6.32	8.20
III	13.75 ± 1.13	11.19	16.31	9.32 ± 0.79	7.52	11.11
IV	14.29 ± 1.16	11.66	16.91	8.31 ± 0.61	6.92	9.70
V	14.45 ± 1.12	11.91	16.98	8.07 ± 0.54	6.84	9.29
III декада июня						
I	20.89 ± 0.71	19.28	22.49	11.23 ± 0.42	10.28	12.19
II	20.47 ± 0.71	18.86	22.09	11.12 ± 0.53	9.92	12.32
III	20.10 ± 0.76	18.38	21.82	14.14 ± 0.69	12.59	15.69
IV	20.96 ± 0.83	19.08	22.83	12.68 ± 0.69	11.12	14.23
V	20.67 ± 0.70	19.08	22.26	11.97 ± 0.50	10.83	13.10
I декада июля						
I	25.12 ± 0.97	22.93	27.31	15.89 ± 0.60	14.54	17.25
II	25.09 ± 1.00	22.82	27.36	15.27 ± 0.34	14.50	16.05
III	24.75 ± 0.94	22.63	26.88	17.61 ± 0.51	16.45	18.77
IV	25.80 ± 1.01	23.52	28.08	15.83 ± 0.42	14.87	16.79
V	25.31 ± 0.96	23.13	27.48	14.87 ± 0.38	14.01	15.72
II декада июля						
I	22.67 ± 0.77	20.93	24.41	15.53 ± 0.42	14.58	16.48
II	22.64 ± 0.78	20.88	24.40	13.64 ± 0.43	12.66	14.63
III	22.25 ± 0.75	20.56	23.93	16.40 ± 0.51	15.25	17.55
IV	23.32 ± 0.83	21.45	25.20	14.86 ± 0.57	13.58	16.15
V	22.90 ± 0.77	21.15	24.65	12.64 ± 0.56	11.37	13.90
III декада июля						
I	23.67 ± 0.95	21.54	25.79	23.01 ± 1.25	20.22	25.80
II	23.47 ± 0.96	21.34	25.61	22.64 ± 1.32	19.71	25.57
III	23.39 ± 0.95	21.28	25.50	23.36 ± 1.09	20.95	25.78
IV	23.59 ± 0.90	21.58	25.61	22.94 ± 1.27	20.11	25.77
V	23.59 ± 0.94	21.49	25.68	22.69 ± 1.41	19.55	25.84

Таблица 3. Физико-химические показатели торфа на секциях

Глубина, см	Номер секции				
	I	II	III	IV	V
Степень разложения, %					
0–2	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	5.0
2–4	5.0	5.0	5.0	<5.0	5.0
4–6	5.0	5.0	5.0	<5.0	5.0
6–8	10.0	10.0	5.0	10.0	5.0
8–10	40.0	10.0	5.0	5.0	5.0
Зольность, %					
0–2	44.5 ± 1.1	30.4 ± 1.1	49.2 ± 1.1	15.7 ± 0.6	30.1 ± 1.1
2–4	33.6 ± 1.1	6.5 ± 0.4	8.1 ± 0.6	6.4 ± 0.4	13.9 ± 0.6
4–6	10.3 ± 0.6	2.8 ± 0.4	4.8 ± 0.4	6.4 ± 0.4	5.6 ± 0.4
6–8	6.1 ± 0.4	1.7 ± 0.4	3.1 ± 0.4	10.2 ± 0.6	4.4 ± 0.4
8–10	5.2 ± 0.4	1.6 ± 0.4	3.9 ± 0.4	2.4 ± 0.4	3.1 ± 0.4
Обменная кислотность (pH)					
0–2	2.93	2.99	2.99	2.99	2.87
2–4	2.91	2.75	2.73	2.71	2.74
4–6	2.85	2.70	2.70	2.71	2.65
6–8	2.88	2.71	2.69	2.76	2.61
8–10	2.83	2.77	2.77	2.72	2.62

Примечание. Граница погрешности при $p = 0.95$ по данным степени разложения торфа в абсолютных величинах составляет 5%, а обменной кислотности – 0.14 ед. pH. Для значений зольности указаны границы погрешности при вероятности $p = 0.95$ в абсолютных величинах.

всех разрезах колеблется в пределах 2.61–2.99 ед. pH, при этом на всех секциях прослеживается постепенное увеличение pH снизу вверх.

По результатам анализа ботанического состава образцов торфа (рис. 4) установлено, что на всех секциях ПП в нижних слоях разрезов преобладает *Sphagnum fuscum*. Снизу вверх содержание его остатков уменьшается, а кустарничков семейства Ericaceae становится больше. Эта тенденция наиболее отчетливо, поступательно проявляется на первых двух секциях. На III секции количество остатков сфагновых мхов на протяжении разреза остается стабильным и только в самом верхнем слое резко уменьшается. Кроме того, в верхних слоях наблюдается увеличение встречаемости мхов-печеночников (*Riccardia latifrons* (Lindb.) Lindb., *Mylia anomala* (Hook.) S. Gray) и зеленых мхов (*Polytrichum strictum* Brid.), для которых характерно заселение повышенный микрорельефа и непереувлажненных понижений верховых болот.

В СПС присутствует пыльца растений, произрастающих как на болоте, так и на окружающих болото суходолах, соответственно локального и регионального компонентов. Последний представлен в основном пылью древесных растений: пихты (*Abies*), ели (*Picea*), лиственницы (*Larix*), березы (*Betula* sect. *Albae*) и ольхи (*Alnus*). Пыльца сосен (*Pinus sylvestris* и *P. sibirica*) в образцах торфа

имеет как региональное, так и локальное происхождение. Из кустарников, произрастающих на болоте, в пыльцевых спектрах представлены *Betula nana* и частично – *Salix*, из кустарничков – *Ericaceae*. Пыльца травянистых растений и споры мхов, плаунов, хвощей и папоротников имеют главным образом локальное и сублокальное происхождение.

Сравнение пыльцевых диаграмм растений, произрастающих непосредственно на болоте, показало, что на I и II секциях количество пыльцы *P. sylvestris* в спектрах снизу вверх сначала увеличивается, а к поверхности уменьшается (рис. 5). В поверхностных слоях возрастает количество пыльцы кустарников и кустарничков (*Betula nana*, *Ericaceae*), а влаголюбивых осок (*Cyperaceae*) и спор *Sphagnum* уменьшается, что согласуется с данными ботанического состава торфа. На более удаленных от факела секциях эти закономерности выражены слабее. Количество спор *Sphagnum* на IV и V секциях также уменьшается к поверхности, что соответствует изменениям в ботаническом составе торфа. Исключение составляют данные по III секции, на которой количество спор сфагноума в поверхностном слое увеличивается, а вегетативных остатков резко уменьшается. Возможно, это связано с отмеченными выше гидротермическими условиями, сложившимися на этой секции под

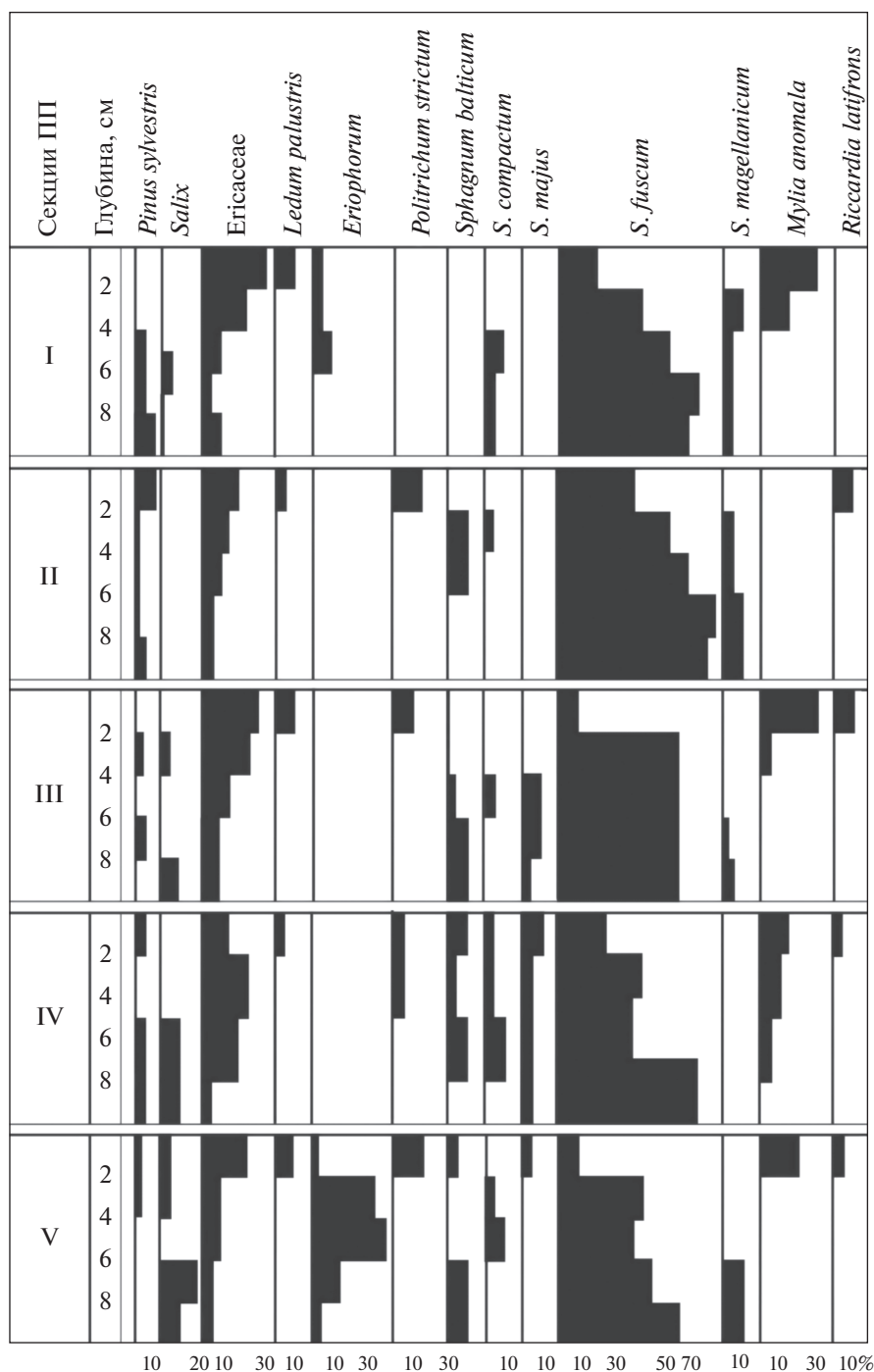


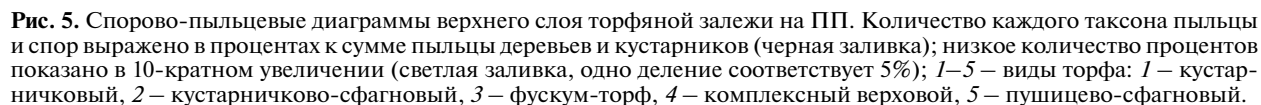
Рис. 4. Диаграммы ботанического состава торфа на секциях. Количество каждого таксона выражено в % от общей суммы растительных остатков.

влиянием факела, которые вызвали подавление вегетативного роста и активизацию репродуктивной функции сфагновых мхов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что факел оказывает ожидаемый трансформирующий эффект на процесс торфообразования

на олиготрофном болоте. Его влияние происходит путем теплового воздействия на растения и торф, через изменение гидротермического режима, а также загрязнение воздуха пылью, которая оседает на поверхности болота. Исходно мы предполагали, что влияние на окружающую среду небольшого одиночного (точечного) объекта, каким является факел, предполагает монотонные изменения градиентов связанных с ним факторов



Согласно литературным данным, изменение УБВ на болотах Западной Сибири в течение веге-

тационного периода обычно составляет 0.4–0.7 м [30]. По сообщениям других авторов [31], варьирование УБВ в летние месяцы на 0.5–1.0 м ниже поверхности торфяной залежи является характерной особенностью эксплуатируемых верховых болот, где создаются неблагоприятные условия для развития сфагноума. На I секции во все периоды наблюдений УБВ дополнительно снижалось до 20–35%. По мере удаления от факела его влияние ослабевает, и на расстоянии 250 м (III секция) наблюдается максимальная обводненность.

Таким образом, на гидрологический режим торфяной залежи на исследованном участке, кроме естественных сезонных колебаний (поступления осадков), оказывает влияние и факельная установка. Понижение УБВ происходит как в результате дренажного воздействия прилегающей искусственной котловины вокруг факела, так и его теплового влияния, усиливающего испарение, вследствие чего уменьшается сила фильтрационного противодействия. В связи с длительным высыханием на поверхности торфяной залежи образуется гидрофобный горизонт, в котором уменьшается инфильтрационная способность [32]. На границе бровки котлована высыхание приводит к усадке и уплотнению торфяной залежи, растрескиванию ее поверхности и, возможно, усилению приповерхностного стока болотных вод.

Изменения температуры воздуха по секциям, очевидно, связаны с тепловым воздействием факела, поскольку с удалением от него как среднегодовая, так и подекадная (в течение вегетационного периода) температура приземного слоя воздуха уменьшается. Температура корнеобитаемого горизонта торфа, как показали результаты измерений, в меньшей степени зависит от расстояния до факела и его непосредственного теплового воздействия. Большее влияние на эти показатели оказывает УБВ, что объясняется различной термовлагопроводностью влажного и сухого торфа при разных УБВ. В более влажной среде перенос тепла происходит интенсивнее, чем в сухой. Максимальная температура торфа на III секции, очевидно, обусловлена наиболее высоким УБВ. В то же время более высокая температура торфа на I секции по сравнению со II свидетельствует о превалировании здесь прямого теплового воздействия факела.

Степень разложения торфа (гумификация) обусловлена интенсивностью биохимических процессов и в естественных условиях мало зависит от возраста слоев залежи. При обезвоживании (осушении) болот и повышении температуры ее величина увеличивается за счет улучшения аэрации верхнего горизонта залежи [5, 33–36]. Высокая степень разложения торфа на I секции, очевидно, объясняется более глубоким его осушением

и прогреванием от факела, что способствовало интенсивному разложению растительных остатков.

Содержание зольных элементов в олиготрофной торфяной залежи в естественных условиях снизу вверх остается относительно постоянной величиной и зависит от влажности и степени разложения торфа [37]. Увеличение зольности торфа на секциях от нижних к верхним слоям, по-видимому, происходит за счет накопления пыли, которая поступает с минерализованной площадки вокруг факела, и частично продуктов сгорания попутного нефтяного газа. Таким образом, зольность изученных слоев торфа увеличивается не только в связи с интенсивным его разложением, а является в том числе и наносной (вторичной). Наибольшая зольность всех слоев торфа на I секции обусловлена близостью к факелу и его влиянием.

Изменения обменной кислотности верхних слоев торфа, очевидно, также вызваны функционированием факела. В естественных условиях в связи с высокой кислотностью клеточного сока сфагнумов-кальцефобов для верхового сфагнового торфа характерно низкое значение pH — в пределах 2.5–3.6 ед. [38]. По мере накопления олиготрофных сфагновых мхов кислотность увеличивается снизу вверх [39, 40]. Наблюдаемая в зоне влияния факела обратная тенденция, возможно, объясняется накоплением в верхних слоях торфа наносных зольных элементов.

Установленные в зоне влияния факела изменения сообществ болотной растительности, отраженные в ботаническом составе торфа, обусловлены уменьшением влажности субстрата и увеличением его трофности в связи с обогащением зольными элементами. Присутствие значительного количества остатков *Eriophorum* L. в верхнем слое торфяной залежи на V секции, скорее, объясняется локальными топтоэкологическими особенностями и не связано с влиянием факела.

Изменения в пыльцевых спектрах торфяной залежи, в частности уменьшение количества пыльцы осоковых и спор сфагнумов, а также увеличение кустарников, связаны с общим понижением уровня УБВ. Динамику содержания пыльцы сосны обыкновенной по разрезам можно объяснить влиянием теплового излучения факела, которое первоначально стимулировало пыльцевую продуктивность, а длительное тепловое воздействие, вероятно, вызвало ее подавление. Возможно, это произошло в результате сбоя в генеративном цикле, обусловленных продолжающимся тепловым эффектом. Косвенным подтверждением такой возможности являются результаты исследований репродукции *Pinus sylvestris* на территории Красноярского края, которые показали, что потепление климата оказывает негативное влияние на состояние ее генеративных органов

[41]. Продолжительное тепло в осенний период провоцирует начало мейоза уже осенью, что приводит к большому количеству эмбриональных нарушений, слабому пылению и снижению урожаяв шишек и семян.

Анализ пыльцевых кривых *P. sylvestris* по сечениям показал уменьшение эффекта влияния факела по мере удаления от него. Диаграммы разрезов на IV и V секциях по динамике пыльцы основных древесных пород согласуются с верхней частью пыльцевых диаграмм торфяников Западной Сибири — Нижневартковского и Сомотлорского [42], которые показывают увеличение количества пыльцы *P. sibirica* и уменьшение *Betula* sp. в верхних слоях торфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тепловое воздействие факела является одним из основных средообразующих факторов, влияющих на изменение процесса торфообразования на олиготрофном болоте. Это отчетливо проявляется в повышении температуры приземного слоя воздуха. Температура корнеобитаемого горизонта торфа и степень разложения растительных остатков в значительной мере определяются колебаниями УБВ. Увеличение зольности и уменьшение кислотности торфа объясняются как тепловым воздействием факела, так и рассеиванием пыли и накоплением в торфе зольных элементов. Трансформация болотной растительности, отраженная в ботаническом составе торфа и отчасти в СПС (уменьшение участия влаголюбивых сфагновых мхов и увеличение кустарничков), обусловлены, очевидно, не только тепловым влиянием факела, но и понижением УБВ. Влияние факела распространяется на расстояние не менее 250 м.

Длительное комплексное воздействие факела на олиготрофном болоте привело к изменениям в формировании верхнего депонируемого слоя торфяной залежи в сторону его эвтрофикации: увеличению зольности и степени разложения, уменьшению кислотности и смене флуксум-торфа мохово-кустарничковым. Полученные данные могут быть использованы при моделировании развития олиготрофных болот в условиях глобального изменения климата.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН Ботанический сад УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *LaBaugh J.W.* Wetland ecosystems studies from a hydrologic perspective // *Water Resources Bulletin*. 1986. V. 22. P. 1–10.
2. *Вомперский С.Э.* Биологические основы эффективности лесосушения. М.: Наука, 1968. 312 с.

3. *Grabovik S.I., Nazarova L.E.* Linear increment of Sphagnum mosses on Karelian mires (Russia) // *Arctoa*. 2013. V. 22. № 1–4. P. 23–26.
4. *Пьявченко Н.И.* Торфонакопление и его продуктивность // *Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И.* Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 1978. С. 141–155.
5. *Bragg O.M., Tallis J.H.* The sensitivity of peat-covered upland landscapes // *Catena*. 2001. № 42. P. 345–360.
6. *Rydin H., Jeglum J.K.* The Biology of Peatlands. New York: Oxford University Press, 2006. 343 p.
7. *Тюрин С.Н.* Торфяные месторождения. М.: Недра, 1976. 488 с.
8. *World Development Report 2010. Development and Climate Change.* Washington DC: IBRD / World Bank, 2010. 417 p.
9. *Peatlands and Climate Change / Strack M. (ed.)* Finland: International Peat Society, Saarijarven Offset Oy, Saarijarvi, 2008. 223 p.
10. *Mitsch W.J., Bernal B., Nahlik A.M. et al.* Wetlands, carbon, and climate change // *Landscape Ecology*. 2013. V. 28. № 4. P. 583–597.
11. *Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V. et al.* A new map of wetlands in the southern taiga of the west Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide // *Water Resources*. 2017. V. 44. № 2. P. 297–307.
12. *Минаева Т.Ю., Сирин А.А.* Биологическое разнообразие болот и изменение климата // *Успехи современной биологии*. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
13. *Кутепова Е.А., Книжников А.Ю., Кочи К.В.* Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России: ежегодный обзор. М.: WWF России, КППМГ, 2011. Вып. 3. 43 с.
14. *Björge T., Bratseth A.* Measurement of radiation heat flux from large scale flares // *J. Hazardous Materials*. 1996. № 46. P. 159–168.
15. *Schwartz R.E., White J.M.* Predict radiation from flares // *Chemical Engineering Progress*. 1997. V. 93. № 7. P. 42–45.
16. *Shore D.* Making the flare safe // *J. Loss Prev. Process Ind.* 1996. V. 9. № 6. P. 363–381.
17. *Шавнин С.А., Юсупов И.А., Артемьева Е.П., Голиков Д.Ю.* Влияние повышения температуры среды на формирование наземной растительности вблизи газового факела // *Изв. ВУЗов. Лесной журн.* 2006. № 1. С. 21–28.
18. *Shavnin S.A., Yusupov I.A., Montile A.A. et al.* Effect of Increased Ambient Temperature on the Growth Rate of Young Pine Forests in the Impact Zone of a Petroleum Gas Flare // *Rus. J. Ecology*. 2009. T. 40. № 1. С. 1–5.
19. *Деградация и демутиация лесных экосистем в условиях нефтедобычи / Залесов С.В., Кряжевских Н.А., Крупинин Н.Я. и др.* Екатеринбург, 2001. Вып. 1. 436 с.
20. *Шавнин С.А., Юсупов И.А., Артемьева Е.П.* Трансформация структуры нижних ярусов лесоболотной растительности в зоне теплового влияния газового факела // *Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та*. 2013. № 40. С. 20–25.

21. *Yevdokimov I.V., Yusupov I.A., Larionova A.A. et al.* Thermal Impact of Gas Flares on the Biological Activity of Soils // *Eurasian Soil Science*. 2017. V. 50. №. 12. P. 1455–1462.
22. *Гвоздецкий Н.А., Кривоуцкий А.Е., Макунина А.А.* Схема физико-географического районирования Тюменской области // *Физико-географическое районирование Тюменской области*. М.: МГУ, 1973. С. 9–28.
23. *Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А. и др.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
24. ОСТ 56-69-83 “Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки”.
25. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП(ГНТА)-03-010-03.
26. Палеопалинология. Т. I. Л.: Изд-во “Недра”, 1966. 352 с.
27. *Пьявченко Н.И., Елина Г.А., Чачхиани В.Н.* Основные этапы истории растительности и торфонакопления на востоке Балтийского щита в голоцене // *Бюл. комиссии по изучению четвертичного периода*. 1976. № 45. С. 3–24.
28. *Лисс О.Л., Березина Н.А.* Болота Западно-Сибирской равнины. М.: Изд-во МГУ, 1981. 206 с.
29. *Мульдияров Е.Я., Лапишина Е.Д.* Датировка верхних слоев торфяной залежи, используемой для изучения космических аэрозолей // *Метеоритные и метеорные исследования*. Новосибирск: Наука, 1983. С. 75–84.
30. *Лапишина Е.Д.* Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 296 с.
31. *Money R.P., Wheeler B.D.* Some critical questions concerning the restorability of damaged raised bogs // *Applied Vegetation Science*. 1999. V. 2. P. 107–116.
32. *Evans M.G., Burt T.P., Holden J., Adamson J.K.* Runoff generation and water table fluctuations in blanket peat: evidence from UK data spanning the dry summer of 1995 // *J. Hydrology*. 1999. V. 221. № 3–4. P. 141–160.
33. *Маковский В.И., Чиндяев А.С.* Лесоводственно-экологические основы мелиорации лесов на Среднем Урале. Свердловск: УрО РАН СССР, 1988. 96 с.
34. *Clymo R.S.* Models of peat growth. *Suo*. 1992. V. 43. P. 127–136.
35. *Preston M.D., Smemo K.A., McLaughlin J.W., Basiliko N.* Peatland microbial communities and decomposition processes in the James Bay Lowlands, Canada // *Frontiers in Microbiology*. 2012. February. P. 64–74.
36. *Гаврильчик А.П., Кашинская Т.Я.* Трансформация свойств торфа при антропогенном воздействии / Под ред. Лиштвана И.И. Минск: Беларуская навука, 2013. 305 с.
37. *Лиштван И.И., Король Н.Т.* Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 319 с.
38. *Боч М.С., Мазинг В.В.* Экосистемы болот СССР. Л.: Наука, 1979. 188 с.
39. *Маковский В.И., Фильрозе Е.М.* К изучению болот и заболоченных лесов горной части Южного Урала // *Лесообразовательный процесс на Урале и в Зауралье*. Свердловск, 1975. С. 81–93.
40. *Tarnocai C., Zoltai S.C.* Wetlands of arctic Canada // *Wetlands of Canada by National Wetlands Working Group, Canada Committee on Ecological Land Classification*. Montreal: Polyscience Publications Inc., 1988. Ch. 2. P. 29–53.
41. *Носкова Н.Е., Третьякова И.Н.* Репродукция сосны обыкновенной в условиях глобального потепления климата и стратегические пути сохранения вида // *Хвойные бореальной зоны*. 2011. Т. 28. № 1–2. С. 41–46.
42. *Нейштадт М.И.* Возникновение и скорость развития процесса заболачивания // *Научные предпосылки освоения болот Западной Сибири*. М.: Наука, 1977. С. 39–47.