

ПИРОГЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ БОЛОТНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ТОРФА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.А. Синюткина¹, Л.П. Гашкова², Ю.А. Харанжевская³

^{1–3} Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН

¹ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ankalaeva@yandex.ru

² Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gashkova-lp@ramble.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kharan@yandex.ru

Природные пожары являются важным экологическим фактором, определяющим интенсивность круговорота углерода на болотах. В статье представлены оценки последствий пирогенной трансформации и современного состояния выгоревших участков болот таежной и лесотундровой зон Западной Сибири через 6–8 лет после пожара с учетом их внутрифациальной неоднородности. Полевые исследования проведены в 2022 г. на трех болотах (всего 13 постпирогенных и фоновых точек) и включали тахеометрическую съемку поверхности, оценку встречаемости видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, отбор образцов для лабораторного определения физико-технических свойств и ботанического состава торфа. В качестве видов-индикаторов восстановления рассматривали сфагновые мхи, *Polytrichum strictum*, лишайники и кустарнички. В результате исследования обнаружено, что интенсивность пирогенной трансформации определяется исходным состоянием болотной экосистемы и увеличивается в ряду: участок гидrolесомелиорации на верховом Бакчарском болоте – плоскобугристое болото – верховое Усть-Бакчарское болото, осушенное для торфодобычи. На большинстве исследованных точек выгоранию оказались более подвержены понижения микрорельефа, в то время как положительные формы сохранились, либо выгорели частично. Трансформация свойств торфяной залежи распространяется по глубине за пределы выгоревшего слоя и проявляется в снижении влажности, увеличении зольности, плотности и степени гумификации. На первых этапах постпирогенных сукцессий выявлены схожие закономерности для болот таежной и лесотундровой зон, проявляющиеся в интенсивном зарастании *P. strictum*. По результатам исследования сделан вывод, что участок гидrolесомелиорации на Бакчарском болоте имеет возможность восстановления видового состава растительного покрова и возобновления аккумуляции торфа. На Усть-Бакчарском болоте произошли необратимые изменения растительного покрова, где восстановление сфагновых мхов не происходит даже через 20 лет после пожара.

Ключевые слова: лесотундра, южная тайга, осушенное болото, верховое болото, плоскобугристое болото, микрорельеф, сфагновые мхи, природный пожар

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.6

ВВЕДЕНИЕ

Природной особенностью Западной Сибири является ее высокая заболоченность, достигающая 30%, и широкое развитие сфагновых болот, что выводит их на уровень основного средообразующего фактора на данной территории. В результате климатических изменений и усиления антропогенного воздействия в последние десятилетия в бореальной зоне в целом и в Сибири в частности увеличивается частота и интенсивность природных пожаров [Московченко и др., 2020; Feurdean et al., 2020]. Особенно актуальна проблема возгораний для осушенных болот, которые, в связи с упадком торфодобывающей промышленности в конце XX в., были заброшены без необходимой противопожарной обработки – рекультивации, обводнения [Гизатулин и др., 2020]. Природные пожары являются важным

экологическим фактором, определяющим структуру растительного покрова, характер микробиологических, гидротермических и биогеохимических процессов и, как следствие, интенсивность круговорота углерода [Ахметьева и др., 2014; Сизов и др., 2020]. Распределение видов, накопление торфа, гидрологические условия и биогеохимические циклы определяются микротопографическими особенностями болот [Benscoter et al., 2015]. Часто интенсивность горения выше в понижениях микрорельефа, за счет чего теряется почти в два раза больше органического вещества в сравнении с положительными формами [Benscoter, Wieder, 2003]. Это делает актуальным проведение исследований по оценке влияния пожаров и закономерностей постпирогенного восстановления с учетом исходной неоднородности и трансформации микрорельефа поверхности.

Наиболее изученным этот вопрос является для сфагновых болот Канады (Альберта) [Benscoter et al., 2005; Benscoter, Vitt, 2008; Benscoter et al., 2015; Thompson, Waddington, 2013]. На территории России исследования пирогенной нагрузки и восстановления выгоревших болот также являются актуальными и посвящены оценкам отдельных аспектов состояния и динамики постпирогенных участков. Наиболее значимыми являются исследования по оценке трансформации торфяной залежи и потерь углерода в результате пожара [Глухова, Сирин, 2018; Сирин и др., 2019], динамики растительного покрова постпирогенных болот [Копотева, Купцова, 2016], комплексная оценка последствий пожара представлена в работах [Вомперский и др., 2007; Ахметьева и др., 2014; Торфяные болота..., 2020]. На болотах Западной Сибири исследования по оценке последствий пожара немногочисленны и касаются динамики растительности на верховом осушенном болоте, выгоревшем в 1998 г. [Базанов и др., 2002].

Целью исследования является проведение оценки последствий пирогенной трансформации и со-

временного состояния выгоревших участков болот таежной и лесотундровой зон Западной Сибири через 6–8 лет после пожара. В частности, рассмотрены характеристики растительности и верхнего горизонта торфяной залежи с учетом внутрифациальной неоднородности болота, определяющей свойствами микрорельефа поверхности; проведен анализ последствий пожара для болот с разной степенью антропогенной нагрузки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются три ключевых участка: 1) Бакcharское болото; 2) Усть-Бакcharское болото; 3) плоскобугристое болото на междуречье рек Пур и Надым (рис. 1, табл. 1). Все болота относятся к верховому типу. Бакcharское и Усть-Бакcharское болота расположены в подзоне южной тайги Западной Сибири в пределах Томской области. Климат рассматриваемой территории континентальный, среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции в с. Бакchar (1960–2021 гг.) составляет $0,02^{\circ}\text{C}$, количество осадков – 534 мм [Булыгина и др., 2022].

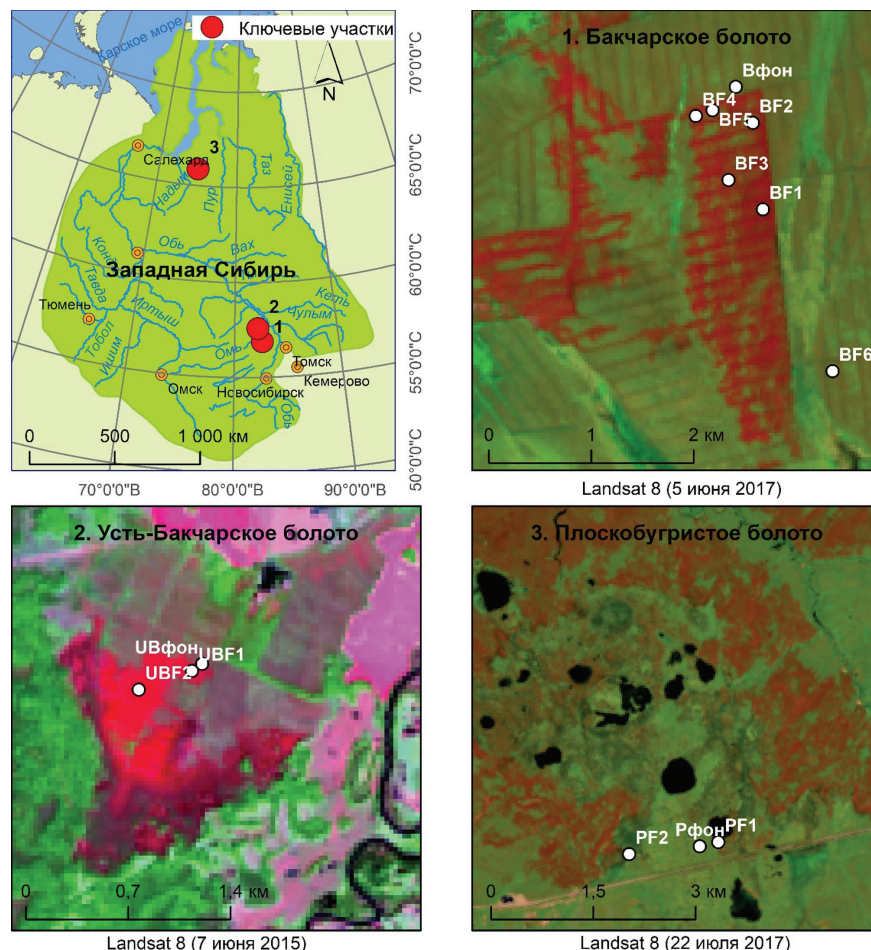


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования

Fig. 1. Map of the study area

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Ключевой участок	Точка	Доля выгорания поверхности, %	Год пожара	Координаты	УБВ, см
Бакcharское верховое болото	BF1	93	2016	56°52'46,9", 82°41'04,4"	–24
	BF2	67	2016	56°53'14,3", 82°40'59,8"	–20
	BF3	71	2016	56°52'56,4", 82°40'44,9"	–16
	BF4	97	2016	56°53'16,8", 82°40'26,4"	–26
	BF5	74	2016	56°53'18,6", 82°40'36,7"	–26
	BF6	–	Около 1990	56°51'55,2", 82°41'42,3"	–28
	Вфон	–	–	56°53'25,8", 82°40'50,5"	–15
Усть-Бакcharское верховое болото	UBF1	99	2014	57°34'39,5", 82°16'21,6"	–28
	UBF2	100	2014	57°34'35,5", 82°15'59,6"	–29
	УВфон	–	Около 2000	57°34'41,0", 82°16'25,9"	–40
Плоскобугристое болото на междуречье рек Пур и Надым	PF1	76	2016	65°52'20,7", 74°58'09,2"	–30
	PF2	78	2016	65°52'11,0", 74°56'27,9"	–13
	Рфон	–	–	65°52'17,9", 74°57'48,1"	–34

Бакcharское болото (северо-восточный отрог Большого Васюганского болота) расположено на водораздельной равнине в бассейне р. Чая (левый приток р. Обь). Общая площадь болота составляет 2700 км². В 1980-х гг. было проведено осушение с целью лесомелиорации на площади 77 км², расстояние между каналами составляет 160–180 м. В настоящее время происходит зарастание каналов и частичное восстановление болота. В 2016 г. произошло выгорание болота на площади около 5 км² в пределах его осушенной части. Полевые исследования проведены на пяти точках в пределах контура пожара 2016 г., на точке, выгоревшей около 30 лет назад, и фоновом участке (см. табл. 1).

Усть-Бакcharское болото расположено на террасе р. Бакchar. Площадь болота составляет 3,5 км², из которых 1,6 км² было осушено в 1980 г. для добычи торфа, расстояние между каналами – 40 м. В разные годы после осушения болото подвергалось выгоранию, последний крупный пожар произошел в 2014 г. на площади 0,5 км². Полевые исследования проведены на двух точках пожара 2014 г., в качестве фоновой точки был выбран участок более старого пожара в связи с отсутствием нетронутых пожаром участков на данном болоте (см. табл. 1). До пожаров изучаемые участки Бакcharского и Усть-Бакcharского болот были представлены сосново-кустарничково-сфагновым растительным сообществом. Средняя мощность торфяной залежи 2,5–3,3 м.

Плоскобугристое болото расположено на водораздельной равнине рек Пур и Надым в зоне лесотундры в пределах Ямало-Ненецкого автономного округа. Район исследования относится к зоне пре-

рывистого распространения многолетнемерзлых пород. Климат умеренно-континентальный, среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции в г. Надым за период 1960–2021 гг. составила –5,3°C, количество осадков – 576 мм [Булыгина и др., 2022]. В августе 2016 г. выгоранию было подвержено 7 км² в пределах болота, а общая площадь контура пожара превысила 300 км². Естественный растительный покров представлен кустарничками и лишайниками на буграх, осокой и сфагновыми мхами в понижениях. Мощность торфяной залежи не превышает 1 м. Исследования проведены на двух постпирогенных и одной фоновой точке (см. табл. 1).

Комплекс полевых исследований проведен в июле–августе 2022 г. Для обеспечения идентичности болотных экосистем фоновых и постпирогенных точек использовались спутниковые данные Landsat 8 на даты до возникновения пожаров. Для выбора постпирогенных точек с разной степенью выгорания использовались спутниковые данные на даты следующего за пожаром вегетационного периода. Геоботанические описания растительности проводились на площадках 10×10 м согласно стандартной методике [Берущашвили, Жучкова, 1997]. Для оценки пространственной неоднородности поверхности на микроуровне на этих же точках выполнена тахеометрическая съемка на площади 25 м² (5×5 м) с шагом 50 см (121 точка на каждой площадке). Для каждой точки съемки определены высота поверхности, присутствие видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, присутствие и толщина горелого слоя. Амплитуда колебаний высот микрорельефа (высота зоны разви-

тия микрорельефа) определялась, как $A = H_{\max} - H_{\min}$, где $H_{\max}$ и $H_{\min}$ – высоты верхней и нижней поверхностей зоны развития микрорельефа [Наставления..., 1990]. Доля выгорания площадки определялась, как отношение количества точек с горелым торфом к общему количеству точек (121) и выражалась в %. Встречаемость видов (в долях от 1) определялась по методу Раункиера по формуле: $R = a/n$, где a – число точек, на которых присутствует данный вид, n – общее количество точек (121). В качестве индикаторов восстановления рассматривались четыре группы растений: сфагновые мхи, *Polytrichum strictum*, лишайники и кустарнички (*Ledum. palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Andromeda polifolia*, *Vaccinium uliginosum*, *Betula nana*), для которых определялась общая встречаемость. Для оценки свойств торфяной залежи проведен отбор образцов торфа на наиболее типичных формах микрорельефа (по две скважины на каждой модельной площадке – на повышении и в понижении микрорельефа) для лабораторного определения физико-технических свойств и ботанического состава. Проведено лабораторное определение влажности (ГОСТ 11306-2013), зольности (ГОСТ 11306-2013), степени гумификации и насыпной плотности торфа [Chambers, 2011]. Даты пожаров определялись с использованием базы данных FIRMS [FIRMS, 2022].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пирогенная трансформация поверхности болота. Для сосново-кустарничково-сфагновых болот характерен кочковатый микрорельеф, образованный слившимися моховыми подушками. Среднеквадратическое отклонение колебаний высот в среднем составляет 8,61, а амплитуда – около 37 см [Синюткина и др., 2018]. На осушенных болотах в зависимости от интенсивности осушения происходит либо увеличение расчлененности поверхности, как это отмечено на участке гидролесомелиорации Бакчарского болота (табл. 2), либо выравнивание поверхности в результате активизации процессов разложения в условиях низких уровней болотных вод на участках, осушенных для добычи торфа (Усть-Бакчарское болото).

Исходные различия в свойствах микрорельефа определяют различия в трансформации поверхности на пирогенных участках. На всех постпирогенных точках Бакчарского болота через шесть лет после пожара отмечено выравнивание поверхности. Горение происходило с разной интенсивностью в зависимости от высоты поверхности. На частично выгоревших точках доля выгорания на положительных формах ниже в сравнении с понижениями и высотами около средней поверхности (см. табл. 2).

Постпирогенные участки на Усть-Бакчарском болоте характеризуются практически полным выгоранием поверхности, а показатели микрорельефа не отличаются от фоновой точки (см. табл. 2). Сходства показателей микрорельефа объясняются отсутствием восстановления растительности, определяющей формирование микрорельефа болот – сфагновых мхов, даже более чем через 20 лет после пожара, что связано с низким уровнем болотных вод.

Особенности выгорания поверхности на плоскобугристом болоте различаются на двух постпирогенных точках. Точка PF1 характеризуется уменьшением доли выгорания от мочажин к буграм, в то время как на точке PF2 в большей степени выгоранию оказались подвержены склоны и понижения бугров, а мочажины и бугры имеют примерно равную долю выгорания (см. табл. 2). В связи с более интенсивным выгоранием мочажин на точке PF1, где толщина горелого слоя достигла 10 см, произошло увеличение стандартного отклонения высот и амплитуды в сравнении с фоновой точкой, а относительно однородное выгорание поверхности на точке PF2 способствовало сохранению значений, характерных для фоновой точки (см. табл. 2).

Пирогенная трансформация растительности. Растительный покров сосново-кустарничково-сфагновых верховых болот характеризуется доминированием сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum*, *S. divinum*, *S. balticum*), широким распространением кустарничкового яруса из багульника (*L. palustre*), хамедафны (*C. calyculata*), андромеды (*A. polifolia*) и, на осушенных болотах, голубики (*V. uliginosum*), преобладанием сосны (*Pinus sylvestris*) высотой до 2–3 м в составе древесного яруса. При осушении увеличивается доля *S. fuscum* в видовом составе сфагновых мхов при снижении их общей встречаемости, появление зеленых мхов и лишайников [Синюткина и др., 2018; Sinyutkina, 2021]. Растительный покров плоскобугристого болота представлен кустарничками (*B. nana*, *L. palustre* и др.), *Rubus chamaemorus* и лишайниками на буграх, осоками и сфагновыми мхами в понижениях.

В результате пожара на Бакчарском и Усть-Бакчарском болотах произошло полное выгорание древесного и кустарничкового ярусов и частичное или полное выгорание мохово-лишайникового яруса [Sinyutkina et al., 2020]. Через шесть лет после пожара на Бакчарском болоте типичным видом на горелых поверхностях является *P. strictum* (встречаемость 0,44–0,95). На большинстве точек большая встречаемость характерна для понижений, где она достигает 0,97, а на выгоревших поверхностях положительных форм изменяется от 0,11 до 0,82. *P. strictum* продолжает сохраняться в видовом составе на точке BF6 (встречаемость 0,35). Отме-

чено частичное восстановление сфагновых мхов, главным образом *S. fuscum*, реже *S. divinum*. Общая встречаемость сфагновых мхов на выгоревших поверхностях изменяется в пределах 0,09–0,37. На трех точках из пяти, изученных более интенсивно, зарастают понижения, где встречаемость сфагновых мхов достигает 0,52 (BF1), а на выгоревших по-

верхностях положительных форм они могут совсем отсутствовать (BF2). На точке BF6 встречаемость сфагновых мхов оказалась даже выше в сравнении с фоновой точкой и составляет 0,88, достигая на повышениях 1. Лишайники встречаются только в понижениях как на фоновой, так и на постпирогенных точках, встречаемость не превышает 0,14 (рис. 2).

Таблица 2

Характеристики микрорельефа постпирогенных и фоновых участков

Точки	Характеристики микрорельефа		Доля выгорания поверхности, %		
	Амплитуда колебаний высот, см	Стандартное отклонение	Отрицательные формы	Средняя поверхность (–5–5 см)	Положительные формы
BF1	32,8	5,70	95	95	85
BF2	42,5	7,56	64	79	29
BF3	38,0	8,46	82	87	30
BF4	33,8	7,20	100	96	97
BF5	34,7	8,85	87	80	51
BF6	44,2	9,10	0	0	0
Вфон	51,0	11,09	0	0	0
UBF1	28,5	5,12	100	99	100
UBF2	32,9	6,72	100	100	100
UBфон	31,9	6,77	0	0	0
PF1	81,0	20,77	92	86*	67
PF2	60,5	13,55	75	87*	78
Рфон	56,0	13,21	0	0	0

Примечание. *Для плоскобугристого болота (точки PF1, PF2) данные приведены для склонов и понижений бугров вне зависимости от высоты.

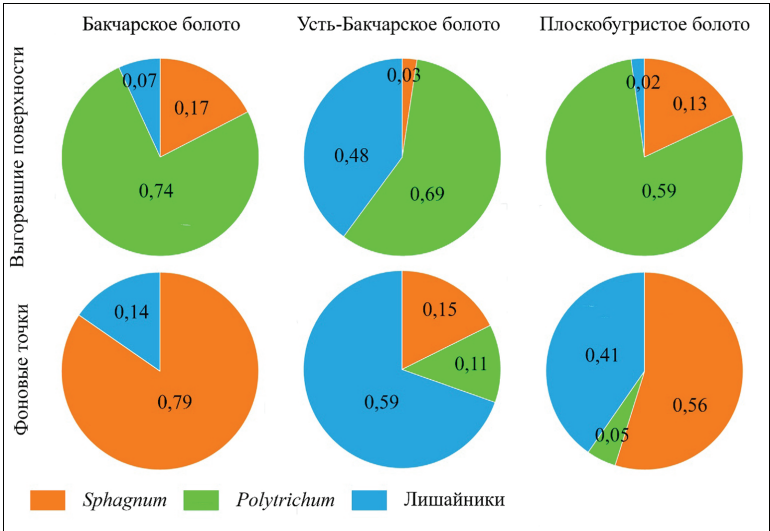


Рис. 2. Встречаемость видов мохово-лишайникового яруса на постпирогенных (средние значения для горелых поверхностей) и фоновых точках (значения представлены в долях от единицы)

Fig. 2. Occurrence of mosses and lichens at post-pyrogenic (mean values for burnout surfaces) and pristine plots (values are presented in fractions of 1)

Для постпирогенных точек Усть-Бакчарского болота также характерно интенсивное зарастание *P. strictum* (встречаемость 0,69) на всех формах микрорельефа. На точке UBфон, выгоревшей около 20 лет назад, встречаемость *P. strictum* составляет 0,11. На болоте произошла критическая деградация сфагнового покрова, вероятно без возможности восстановления в условиях сохраняющихся низких уровней болотных вод. Даже на фоновой точке через 20 лет после пожара не произошло зарастание сфагновыми мхами, встречаемость которых составляет всего 0,19 в понижениях и 0,11 на положительных формах. В видовом составе сфагновых мхов отмечен только *S. fuscum*. На постпирогенных точках, выгоревших в 2014 г., сфагновые мхи практически отсутствуют. Особенностью Усть-Бакчарского болота является широкое распространение лишайников, которые замещают сфагновые мхи в условиях низкого уровня болотных вод. На фоновой точке лишайники распространены равномерно по всей поверхности со средней встречаемостью 0,59. На постпирогенных точках встречаемость несколько ниже (0,41–0,54), увеличивается от 0,16–0,26 в понижениях до 0,50–0,70 на положительных формах (см. рис. 2).

На постпирогенных точках плоскобугристого болота встречаемость *P. strictum* имеет схожие значения с болотами таежной зоны, большая встречаемость характерна для выгоревших поверхностей мочажин, а также пониженных участков бугров и их склонов (0,48–1). Выгоревшие поверхности плоскобугристого болота отличаются низкой встречаемостью сфагновых мхов (0,04–0,16). В целом встречаемость сфагновых мхов выгоревших поверхностей находится на одном уровне с точками Бакчарского болота, доминантой также является *S. fuscum*. На постпирогенных точках встречаемость лишайников единична (см. рис. 2).

На всех болотах за 6–8 лет после пожара произошло интенсивное зарастание кустарничками, тем не менее их встречаемость продолжает оставаться ниже в сравнении с фоновыми точками – 0,47–0,69 на Бакчарском, 0,44–0,69 на Усть-Бакчарском, 0,44–0,56 на плоскобугристом болотах, 0,70–0,78 на фоновых точках.

Закономерности постпирогенного восстановления растительности определяются состоянием болота до пожара. Важным фактором является степень осушения болота, определяющая средний многолетний уровень болотных вод. При низкой интенсивности осушения отмечено зарастание сфагновыми мхами уже через несколько лет после пожара, при высокой интенсивности восстановления типичных для сосново-кустарничково-сфагновых болот видов оказалось невозможным даже через 20 лет после пожара.

Пирогенная трансформация торфяной залежи. Верхние слои торфяной залежи на всех точках образованы сфагновыми торфами. На положительных формах преобладает фускум торф, за исключением бугра фоновой точки плоскобугристого болота (Рфон), где под лишайниками следует слой, образованный *S. balticum* и *S. majus*. В понижениях ботанический состав торфа более разнообразный – встречаются виды торфа: фускум (BF2, BF4, BF5, BF6, Вфон, UBF1, UBфон), балтикум (BF1) и магелланикум (BF3, UBF2). В ботаническом составе мочажин плоскобугристого болота встречаются остатки *S. balticum* и *S. fuscum*. Наибольшая трансформация торфяной залежи проявляется в верхнем горизонте (0–5 см). Влажность верхнего слоя выгоревших понижений изменяется в пределах 79,5–90,4% и в среднем составляет 85,3% на верховых болотах таежной зоны, что на 6% ниже в сравнении с понижениями на фоновом участке Бакчарского болота. На выгоревших участках плоскобугристого болота также отмечено снижение влажности с 93,2 до 87,4%. В пределах выгоревших участков таежной зоны отмечено увеличение зольности с 1,5% на фоновой точке до 8,6–16,7% и с 4,3 до 6,5–9,5% на плоскобугристом болоте. На всех постпирогенных точках отмечено увеличение плотности торфа с 0,04 до 0,05–0,11 г/см³. Степень гумификации различается между постпирогенными точками (33–57%). На фоновой точке Бакчарского болота степень гумификации составила 31%, Усть-Бакчарского – 46%. На плоскобугристом болоте отмечено более значимое увеличение степени гумификации с 28 до 44–50%.

Различия свойств торфяной залежи постпирогенных и фоновых точек проявляются до глубины 15 см в понижениях и достигают 35 см на повышениях. В понижениях наибольшая глубина проявления различий характерна для зольности, вероятно за счет просачивания зольных элементов вглубь торфяной залежи. На Бакчарском болоте отмечено увеличение зольности до глубины 10–15 см, в том числе в слое 5–10 см зольность в среднем в 2–3 раза выше в сравнении с фоновым участком. На Усть-Бакчарском болоте увеличение зольности менее выражено и превышение значений отмечено только на точке UBF2 в слое 5–10 см, в 1,7 раз в сравнении с фоновой точкой. На некоторых точках Бакчарского болота (BF1, BF4, BF5) уплотнение торфяной залежи прослеживается до глубины 15 см, где значения плотности в слое 5–15 см превышают фоновые в 1,4–1,5 раза. На Усть-Бакчарском и плоскобугристом болотах увеличение плотности в этом слое не выявлено. На отдельных точках наблюдается увеличение степени гумификации до глубины 10–15 см на 7% на точке UBF2 и на 8–13% на плоскобугристом болоте.

На Бакчарском болоте трансформация свойств отмечена даже на невыгоревших моховых подушках пирогенных участков и проявляется в увеличении зольности в 2,2–3 раза в слое 25–35 см. На выгоревших моховых подушках отмечено изменение всех рассматриваемых показателей – увеличение степени гумификации на 6–16%, плотности в 1,6–2 раза, зольности в 2,2–3,2 раза и уменьшение влажности на 3–4%. Положительные формы на Усть-Бакчарском болоте отличаются меньшей глубиной трансформации, которая составляет всего 5–10 см. В слое 5–10 см наблюдается увеличение зольности в 1,6–2,5 раза, плотности в 2,3 раза и снижение влажности на 4–7%. На плоскобугристом болоте изменения свойств торфа бугров глубже 5 см не выявлено.

На выгоревшей около 30 лет назад точке Бакчарского болота (BF6) на положительных формах микрорельефа – сфагновых подушках отмечены проявления горелого слоя на глубине 30 см, что подтверждает возможность восстановления сфагновой растительности и возобновление аккумуляции торфа. В пределах понижений микрорельефа современная аккумуляция торфа не выявлена.

Таким образом, выгорание болот привело к трансформации всех рассматриваемых характеристик верхнего слоя торфа. Наибольшие изменения характерны для зольности верхнего слоя, значения которой увеличились в 1,5–9 раз в сравнении с фоновыми участками.

Обсуждение результатов. Неоднородность микрорельефа болот оказывает сильное влияние на распространение огня и интенсивность горения [Benscoter et al., 2015]. В зависимости от исходного состояния болота до пожара, большему выгоранию могут оказаться подвержены как положительные, так и отрицательные формы микрорельефа. В условиях относительно высокого обводнения болота интенсивность горения больше в понижениях микрорельефа, в то время как положительные формы менее подвержены выгоранию и часто остаются нетронутыми огнем, как это было отмечено на сфагновых болотах в Канаде [Thompson, Waddington, 2013; Benscoter et al., 2015]. По результатам нашего исследования, эта закономерность была отмечена на верховом Бакчарском и плоскобугристом болотах. Устойчивость положительных форм к выгоранию связана с видовым составом моховой растительности и ботанического состава верхних горизонтов торфяной залежи. Для них характерно доминирование *S. fuscum*, обладающего способностью удерживать влагу в засушливые периоды, предотвращая высыхание торфяной залежи [Benscoter et al., 2015]. В сравнении со сфагновыми мхами, зеленые мхи характеризуются большей гидрофобностью [Moore et al., 2017]. На осушенных с целью лесомелио-

рации верховых болотах таежной зоны Западной Сибири понижения заняты либо лишайниками и зелеными мхами, либо разреженным покровом из сфагновых мхов [Sinyutkina, 2021], не способных сохранять влагу, что привело к более сильному выгоранию понижений в сравнении с моховыми подушками. При этом отмечено, что, несмотря на меньшую глубину горения на положительных формах, для них может быть характерно большее нарушение гидрологических условий, что будет сказываться на восстановлении сфагновой растительности в связи с формированием гидрофобного слоя под воздействием высоких температур во время пожара [Kettridge et al., 2015; Moore et al., 2017]. В понижениях, наоборот, может произойти снижение гидрофобности за счет выгорания покрова из зеленых мхов и лишайников и обнажения сфагнового торфа, способного эффективно удерживать влагу, и тем самым создавая условия для восстановления сфагновых мхов. Это вероятно объясняет более интенсивное восстановление сфагновых мхов в понижениях в сравнении с повышениями, отмеченное на трех постпирогенных точках Бакчарского болота.

В других случаях, описанных в [Benscoter et al., 2005], на повышениях достаточно быстро восстанавливается покров из *S. fuscum*, в то время как восстановление растительности в понижениях более динамично и непредсказуемо. Поэтому на положительных формах аккумуляция торфа начинается быстрее, а понижения требуют большего времени для восстановления растительного покрова, способного накапливать торф. В результате нашего исследования схожая тенденция была выявлена на точке пожара 1990 г. на Бакчарском болоте, где толщина слоя сфагнового торфа, отложившегося над горелым горизонтом, включая живой сфагновый покров, составляет уже 30 см (скорость аккумуляции торфа около 1 см/год), в то время как в понижении аккумуляция торфа практически отсутствует. Несмотря на то что средняя скорость аккумуляции торфа в голоцене на территории Западной Сибири изменялась в пределах 0,35–1,13 мм/год [Borren et al., 2004], современная скорость прироста торфа значительно выше и может достигать нескольких сантиметров в год в поверхностном слое благодаря высокой продуктивности сфагнового покрова [Taminskas et al., 2018]. Высокая скорость аккумуляции отмечена для сосново-кустарничково-сфагновых верховых болот южно-таежной подзоны Западной Сибири, где она на осушенных болотах составила 0,07–2,0 см/год и на естественных – 0,35–0,48 см/год [Sinyutkina, 2021]. Таким образом, скорость аккумуляции торфа на положительных формах постпирогенных участков Бакчарского болота сопоставима с невыгоревшими аналогичными болотами.

На более сухих болотах большему выгоранию становятся подвержены повышения микрорельефа [Вомперский и др., 2007]. На Усть-Бакчарском болоте, где выгорела вся поверхность, средняя толщина горелого слоя оказалась выше на положительных формах в сравнении с понижениями. На таких болотах повышения микрорельефа могут практически полностью деградировать из-за отсутствия фрагментов сфагнового покрова и конкурентного замещения другими видами [Benscoter et al., 2005].

Пожары приводят к увеличению неоднородности поверхности и увеличению амплитуды колебаний высот за счет углубления понижений в результате как прямого воздействия горения, так и косвенного влияния, заключающегося в более интенсивном проседании понижений в первые годы после пожара [Benscoter et al., 2015; Sinyutkina et al., 2020]. Через 6–8 лет после пожара на большинстве исследованных нами постпирогенных точек наоборот отмечено уменьшение амплитуды и выравнивание поверхности, что вероятно объясняется постепенным уплотнением и проседанием положительных форм с нарушенным покровом из сфагновых мхов вследствие нарушения способности удержания влаги. Таким образом, процесс деградации торфяной залежи на постпирогенных болотах происходит не только непосредственно во время горения, но и за счет трансформации гидрологических условий при смене доминантов растительного покрова [Копотева, Купцова, 2016; Малащук, Филиппов, 2021].

Закономерности пирогенной трансформации и постпирогенного восстановления болот имеют различия как на локальном, так и на региональном уровнях и определяются не только интенсивностью пожара, но и исходным состоянием болотной экосистемы. Свойства растительного покрова и торфяной залежи, режим увлажнения и особенности микрорельефа находятся в тесной взаимосвязи и определяют пространственную изменчивость постпирогенного функционирования болот, в первую очередь проявляющуюся в неоднородности накопления углерода. Поэтому важным аспектом в оценках баланса углерода на постпирогенных болотах является учет динамических взаимосвязей между компонентами экосистемы и учет неоднородности условий на микроуровне [Benscoter, Vitt, 2008].

ВЫВОДЫ

Последствия пожара на естественном плоскобугристом болоте оказались более значимы в сравнении с верховым Бакчарским болотом, осушенном с целью лесомелиорации, что проявляется в большей глубине прогорания торфяной залежи. Наибольшая постпирогенная трансформация с полным выгоранием поверхности характерна для осушенного с целью добычи торфа Усть-Бакчарского болота.

Пространственная неоднородность выгорания в значительной степени определяется особенностями микрорельефа поверхности болота. На большинстве исследованных точек выгоранию оказались более подвержены понижения микрорельефа, в то время как положительные формы сохранились либо выгорели частично.

В результате пожара трансформация свойств торфяной залежи распространяется по глубине за пределы слоя, непосредственно подверженного выгоранию, и проявляется в снижении влажности, увеличении зольности, плотности и степени гумификации. Максимальная глубина трансформации достигает 35 см.

В результате исследования выявлены схожие закономерности постпирогенных сукцессий для верховых болот таежной и плоскобугристых лесотундровой зоны, проявляющиеся в интенсивном зарастании *P. strictum* на первых стадиях восстановления. Зарастание сфагновыми мхами не отличается между выгоревшими поверхностями плоскобугристого болота и осушенного с целью лесомелиорации Бакчарского болота, но на осушенном с целью добычи торфа Усть-Бакчарском болоте восстановление сфагновых мхов не происходит даже через 20 лет после пожара.

Исследование показало, что на верховых болотах, осушенных с целью лесомелиорации в условиях таежной зоны Западной Сибири, после пожара возможно полное восстановление сфагновых мхов и возобновление процесса аккумуляции торфа, что подтверждается высокой встречаемостью сфагновых мхов уже через шесть лет после пожара и наличием горизонта торфа мощностью 30 см над горелым слоем на точке, выгоревшей около 30 лет назад.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахметьева Н.П., Белова С.Э., Джамалов Р.Г., Куличевская И.С., Латина Е.Е., Михайлова А.В. Естественное восстановление болот после пожаров // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 4. С. 343–354. DOI: 10.7868/S0321059614040026.
- Базанов В.А., Егоров Б.А., Льготин В.А., Скугарев А.А. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья рек Икса-Шегарка) // Большое Васюганское болото. Со-

- временное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 190–196.
- Берущаивили Н.Л., Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. 320 с.
- Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.
- Гизатуллин А.Т., Алексеенко Н.А., Моисеева Н.А. Использование данных дистанционного зондирования для предупреждения возгораний торфоразработок // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 2. С. 45–52.
- Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588.
- Копотева Т.А., Купцова В.А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамериканской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21.
- Малайчук А.А., Филиппов Д.А. Постпирогенная динамика растительного покрова верхового болота Барское (Вологодская область) // Трансформация экосистем. 2021. № 4(1). С. 104–121.
- Московченко Д.В., Арефьев С.П., Московченко М.Д., Юртаев А.А. Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2020. Т. 27. № 2. С. 243–255.
- Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8: Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 360 с.
- Сизов О.С., Цымбарович П.Р., Ежова Е.В., Соромотин А.В., Приходько Н.В. Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 137–153.
- Синюткина А.А., Гашикова Л.П., Малолетко А.А., Магур М.Г., Харанжевская Ю.А. Трансформация поверхности и растительного покрова осушенных верховых болот юго-востока Западной Сибири // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2018. № 43. С. 196–223.
- Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И., Маслов А.А., Гульбе Я.И. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422.
- Торфяные болота центральных областей Европейской части России: их трансформация за последние 100 лет / Н.П. Ахметьева, А.В. Михайлова, Г.Н. Кричевец, А.Ю. Беляев. М.: ГЕОС, 2020. 134 с.
- Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography, *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, no. 45, p. 1133–1137, DOI: 10.1139/cjfr-2015-0028.
- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a postfire chronosequence, *Ecosystems*, 2008, no. 11, p. 1054–1064, DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4.
- Benscoter B.W., Vitt D.H., Wieder R.K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, no. 35, p. 2188–2193.
- Benscoter B.W., Wieder R.K. Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire, *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, no. 33(12), p. 2509–2513, DOI: 10.1139/x03-162.
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia, *Quat. Res.*, 2004, no. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamic, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, article 07, p. 1–10.
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I. et al. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia, *Quaternary Science Reviews*, 2020, no. 244, 106495, DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.
- Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J. et al. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift, *Scientific Reports*, 2015, no. 5, 8063, DOI: 10.1038/srep08063.
- Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N. et al. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 554, p. 656–665.
- Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics, *Catena*, 2021, no. 205, 105464, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G. et al. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation, *IOP Conference Series: Earth Environment Science*, 2020, vol. 408, 012037.
- Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms, *Journal of Hydrology*, 2013, no. 486, p. 48–56.
- Taminskas J., Linkeviciene R., Simanauškiene R. et al. Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability, *Geomorphology*, 2018, no. 304, p. 40–49, DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.12.026.

Электронные ресурсы

- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коришнуова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. URL: <http://meteo.ru/it/178-aisori> (дата обращения 14.02.2022).
- FIRMS (Fire Information for Resource Management System), URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (дата обращения 10.02.2022).

Поступила в редакцию 09.03.2023

После доработки 23.07.2023

Принята к публикации 06.10.2023

PYROGENIC CHANGES OF BOG VEGETATION AND PEAT IN WESTERN SIBERIA

A.A. Sinyutkina¹, L.P. Gashkova², Yu.A. Kharanzhevskaya³

^{1–3} *Siberian Federal Scientific Centre of Agro-Bio Technologies, Russian Academy of Sciences,
Siberian Research Institute of Agriculture and Peat*

¹ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ankalaeva@yandex.ru*

² *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gashkova-lp@ramble.ru*

³ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: kharan@yandex.ru*

Wildfires are an important environmental factor which determines the carbon cycle intensity in mires. The article presents the assessment of the consequences of pyrogenic transformation and the current state of burnt-out mires in the taiga and forest-tundra zones of Western Siberia 6–8 years after the wildfire, with regard to their microhabitat heterogeneity. Field studies were conducted in 2022 on three mires (a total of 13 post-pyrogenic and pristine plots) and included a total-station survey of the surface, an assessment of the occurrence of species in the grass-dwarf shrub and moss-lichen tiers, sampling for laboratory analysis of the physical properties and botanical composition of peat. *Sphagnum* mosses, *Polytrichum strictum*, lichens and dwarf shrubs were considered as recovery indicator species. As a result of the study, it was found that the intensity of pyrogenic transformation is determined by the initial state of bog ecosystem and increases in a row: the hydro forestation site on the Bakchar raised bog – palsa – the Ust-Bakchar raised bog drained for peat extraction. At most of the studied plots, microdepressions were more susceptible to burnout, while hummocks were preserved or only partially burned out. The transformation of peat deposit properties extends beyond the layer directly exposed to burnout, and manifests itself in a decrease in water content, and an increase in ash content, bulk density and degree of humification. At the first stages of post-pyrogenic successions, similar patterns were revealed for the mires of taiga and forest-tundra zones, i.e. an intensive overgrowth with *P. strictum*. According to the results of the study, it was concluded that the hydroforestation site in the Bakchar bog could possibly restore the species composition of vegetation cover and resume peat accumulation. Irreversible changes in vegetation cover have occurred in the Ust-Bakchar bog, where the restoration of sphagnum mosses does not occur even 20 years after the fire.

Keywords: forest-tundra, southern taiga, drained bog, raised bog, palsa, microtopography, *Sphagnum*, wildfire

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-77-10024).

REFERENCES

- Akhmet'eva N.P., Belova S.E., Dzhamalov R.G., Kulichevskaya I.S., Lapina E.E., Mikhailova A.V. Estestvennoe vosstanovlenie bolot posle pozharov [Natural restoration of mires after wildfires], *Vodnye resursy*, 2014, vol. 41, no. 4, p. 343–354. (In Russian)
- Akhmet'eva N.P., Mikhailova A.V., Krichevets G.N., Belyaev A.Yu. *Torfyanye bolota tsentralnykh oblastey Evropejskoj chaste Rossii: ih transformatsiya za poslednie 100 let* [Peat bogs of central regions of the European part of Russia: their transformation during recent 100 years], Moscow, GEOS Publ., 2020. 134 p.
- Bazanov V.A., Egorov B.A., L'gotin V.A., Skugarev A.A. [Modern spatial dynamics of the Great Vasyugan Mire (case study of the interfluvium of the Iksa and Shegarka rivers)], *Bol'shoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan Mire: Modern state and development processes], M.V. Kabanov (ed.), Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002, p. 190–196. (In Russian)
- Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography, *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, no. 45, p. 1133–1137, DOI: 10.1139/cjfr-2015-0028.
- Benscoter B.W., Vitt D.H. Spatial patterns and temporal trajectories of the bog ground layer along a postfire chronosequence, *Ecosystems*, 2008, no. 11, p. 1054–1064, DOI: 10.1007/s10021-008-9178-4.
- Benscoter B.W., Vitt D.H., Wieder R.K. Association of postfire peat accumulation and microtopography in boreal bogs, *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, no. 35, p. 2188–2193.
- Benscoter B.W., Wieder R.K. Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire, *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, no. 33(12), p. 2509–2513, DOI: 10.1139/x03-162.
- Beruchashvili N.L., Zhuchkova V.K. *Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy* [Methods of complex physical and geographical research], Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1997, 320 p. (In Russian)
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia, *Quat. Res.*, 2004, no. 61, p. 42–51, DOI: 10.1016/j.yqres.2003.09.002.
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamic, *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, article 07, p. 1–10.

- Feurdean A., Florescu G., Tantau I. et al. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia, *Quaternary Science Reviews*, 2020, no. 244, 106495, DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.
- Gizatullin A.T., Alexeenko N.A., Moiseeva N.A. Ispolzovanie dannyh distantsionnogo zondirovaniya dlya preduprezhdeniya vozgoranij torforazrabotok [Using remote sensing data to monitor peat field fires], *Vestn. Mosk. Unta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 2, p. 45–52. (In Russian)
- Glukhova T.V., Sirin A.A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog, *Eurasian soil science*, 2018, vol. 51, no. 5, p. 542–549.
- Kettridge N., Turetsky M., Sherwood J. et al. Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift, *Scientific Reports*, 2015, no. 5, 8063, DOI: 10.1038/srep08063.
- Kopoteva T.A., Kuptsova V.A. Effect of fires on the functioning of phytocenoses of peat bogs in the Middle-Amur lowland, *Russian journal of ecology*, 2016, vol. 47, no. 1, p. 11–18.
- Malashchuk A.A., Philippov D.A. Postpirogennaya dinamika rastitelnogo pokrova verhovogo bolota Barskoe (Vologodskaya oblast) [Post-pyrogenic dynamics of the vegetation cover of the Barskoe raised bog (Vologda Region, Russia)], *Ecosystem Transformation*, 2021, no. 4(1), p. 104–121. (In Russian)
- Moore P.A., Lukenbach M.C., Kettridge N. et al. Peatland water repellency: Importance of soil water content, moss species, and burn severity, *Journal of Hydrology*, 2017, no. 554, p. 656–665.
- Moskovchenko D.V., Aref'ev S.P., Moskovchenko M.D., Yurtaev A.A. Spatio-temporal analysis of wildfires in the forest tundra of Western Siberia, *Contemporary problems of ecology*, 2020, vol. 13, no. 7, p. 193–203.
- Nastavleniya gidrometeorologicheskimi stantsiyami i postam, vyp. 8, *Gidrometeorologicheskiye nablyudeniya na bolotakh* [Manual for hydrometeorological stations and centers, vol. 8, Hydro-meteorological observations at bogs], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 360 p. (In Russian)
- Sinyutkina A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics, *Catena*, 2021, no. 205, 105464, DOI: 10.1016/j.catena.2021.105464.
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Maloletko A.A., Magur M.G., Kharanzhevskaya Y.A. Transformatsiya poverhnosti i rastitelnogo pokrova osushennykh verkhovykh bolot yugo-vostoka Zapadnoj Sibiri [Transformation of the surface and vegetation cover of drained bogs in the south-east of Western Siberia], *Tomsk State University Journal of Biology*, 2018, vol. 43, p. 196–223, DOI: 10.17223/19988591/43/10. (In Russian)
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G. et al. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation, *IOP Conference Series: Earth Environment Science*, 2020, vol. 408, 012037.
- Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I. Depth of peat burning and carbon losses during an underground forest fire, *Contemporary problems of ecology*, 2020, vol. 13, no. 7, p. 769–779.
- Sizov O.S., Tsybarovich P.R., Ezhova E.V., Soromotin A.V., Prikhodko N.V. Otsenka postpirogennoj dinamiki tundrovoj rastitelnosti na severe Zapadnoj Sibiri za poslednie 50 let (1968–2018) na osnove dannyh DZZ detal'nogo i vysokogo razresheniya [Assessment of the post-pyrogenic dynamics of tundra vegetation in the northern part of Western Siberia over the past 50 years (1968–2018) based on detailed and high resolution remote sensing data], *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2020, vol. 17, no. 4, p. 137–153. (In Russian)
- Taminskas J., Linkeviciene R., Simanauskiene R. et al. Climate change and water table fluctuation: Implications for raised bog surface variability, *Geomorphology*, 2018, no. 304, p. 40–49, DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.12.026.
- Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms, *Journal of Hydrology*, 2013, no. 486, p. 48–56.
- Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Koval'ev A.G. Usloviya i posledstviya pozharov v sosnyakh na osushennykh bolotakh [The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs], *Russian Journal of Forest Science*, 2007, no. 6, p. 35–44. (In Russian)
- Web sources*
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh rossii: svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh no. 2015620394 [Description of the data array of monthly precipitation amounts at Russian stations: certificate of state registration of the database no. 2015620394], URL: <http://meteo.ru/it/178-aisori> (access date 14.02.2022).
- FIRMS (Fire Information for Resource Management System), URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (access date 10.02.2022).

Received 09.03.2023

Revised 23.07.2023

Accepted 06.10.2023