

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.561

doi: 10.17223/25421379/35/7

ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА И СТЕПЕНИ ВЫГОРАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ПОСТПИРОГЕННЫХ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ



Юлия Александровна Харанжевская¹, Анна Алексеевна Синюткина²

^{1,2} Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия

¹ kharan@yandex.ru

² ankalaeva@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований изменений гидрологических характеристик и химического состава вод болот Западной Сибири под влиянием пирогенного фактора на микроуровне. Исследования показали, что после пожаров в связи с формированием гидрофобного слоя на поверхности отмечается снижение содержания в болотных водах O₂, величин ОВП и, наоборот, повышение pH, ЕС, концентрации CO₂ и температуры. После пожара уровни болотных вод повышаются, а коэффициенты фильтрации и водоудерживающая способность верхнего слоя торфяной залежи снижаются.

Ключевые слова: болотные воды, микрорельеф, химический состав, характеристики, уровни болотных вод, коэффициент фильтрации, лесомелиорация, пирогенный фактор, Западная Сибирь

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 22-77-10024.

Для цитирования: Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Влияние микрорельефа и степени выгорания поверхности на водно-физические свойства торфяной залежи и характеристики химического состава вод постпирогенных болот Западной Сибири // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 89–100. doi: 10.17223/25421379/35/7

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/7

MICROTOPOGRAPHY AND SURFACE BURNING EFFECTS ON PEAT HYDROPHYSICAL PROPERTIES AND WATER CHEMISTRY OF POSTPYROGENIC MIRES IN WESTERN SIBERIA

Yulia A. Kharanzhevskaya¹, Anna A. Sinyutkina²

^{1,2} Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologie, RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia

¹ kharan@yandex.ru

² ankalaeva@yandex.ru

Abstract. The paper analyzes changes in the hydrological characteristics and water chemistry of mires in the forest-tundra and taiga zones of Western Siberia under the influence of the pyrogenic factor at the microlevel. In the taiga zone, research was carried out in drained sites of the Bakchar Bog (spurs of the Great Vasyugan Mire) and Ust-Bakchar bog, in the forest-tundra on a pristine palsa near Pangody village. All studied mires burned out in 2014–2016. The studies were carried out on 12 model key plots with an area 25 m², where the water chemistry, hydraulic conductivity and water table levels were determined in 9 wells linked to the surface microtopography. The surface microtopography was surveyed using a SOKKIL CX-105 tachometer with a step of 50 cm. The hydraulic conductivity was determined in the 0-50 cm and 50-100 cm layers by pumping using a Solinst 428 sampler. Analysis of the background sites showed initial differences in water chemistry characteristics, the bogs of the taiga zone were drained, as a result, higher O₂ content, pH values, Eh, EC, as well as temperature were noted in the samples due to a more southern location. The palsa near Pangody village was not drained, therefore, lower pH and EC were noted in the waters, but the CO₂ content was higher due to the active processes of decomposition of plant residues under leaching conditions. Studies have shown that after

fires, due to the formation of a hydrophobic layer on the surface, there is a decrease in the O_2 content and Eh values in waters, and vice versa, there is an increase in pH, EC, CO_2 concentration and temperature. Under background unburn conditions, the studied characteristics smoothly decrease from hummock to hollow, and under pyrogenic conditions, variations in pH, EC, T, Eh, CO_2 , O_2 in waters strongly depend on the degree of burnout and the initial transformation of the surface under the influence of drainage. Under the influence of the pyrogenic factor, water table levels increase; with increasing thickness of the burnt layer, the correlation between the height of the surface and the position of water table levels decreases, since the water storage capacity of the upper layer of the peat deposit is disrupted. Hydraulic conductivity in peat deposits of burnt bogs in the taiga zone decrease due to disruption of the porous structure of the upper peat layer, and in the forest-tundra it increase as a result of transformation of the thermal regime. Higher hydraulic conductivity are observed in hollows and at the middle surface level, and, conversely, decrease in hummocks.

Keywords: mires, waters, chemical composition, microtopography, water table level, hydraulic conductivity, forest reclamation, pyrogenic factor, Western Siberia

Sour of financing: The research was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-77-10024.

For citation: Kharanzhevskaya Y.A., Sinyutkina A.A. (2025) Microtopography and surface burning effects on peat hydro-physical properties and water chemistry of mires in Western Siberia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 89–100. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/7

Введение

Природные пожары являются одной из глобальных экологических проблем, а современные климатические изменения увеличивают продолжительность и тяжесть пожароопасного периода. Поэтому отмечается увеличение частоты и интенсивности природных пожаров, а болота становятся все более уязвимы для природных пожаров [Feurdean et al., 2020; Ackley et al., 2021; Kharuk et al., 2021; Nelson et al., 2021].

Пожары оказывают влияние на гидрологический режим болот, отмечается формирование гидрофобного слоя на поверхности болота, что приводит к изменению величины испарения с болот и процесса инфильтрации атмосферных осадков [Thompson, Waddington, 2013]. После пожаров отмечается повышение отметок уровней болотных вод и увеличение амплитуды их колебаний [Харанжевская, 2023], меняются водно-физические свойства (плотность, коэффициент фильтрации, влажность) торфяной залежи [Holden et al., 2013; Sherwood et al., 2013; Ахметьева и др., 2020]. Некоторые данные показывают, что даже спустя более 20 лет сохраняется влияние пожара, которое выражается в более высоких уровнях болотных вод [Головацкая и др., 2023].

Пожары на болотах приводят к изменению их термического режима [Kettridge et al., 2012; Ackley et al., 2021], на выгоревших участках происходит более быстрое ставание снега [Харанжевская, 2022]. Исследования показывают, что на пирогенных участках отмечается более глубокое распространение активных температур ($T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) более чем на 1 м, а температура торфяной залежи на пирогенном участке в среднем в 1,2–1,5 раза выше [Харанжевская, 2022].

После пожара в химическом составе болотных и речных вод отмечается увеличение концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-} , NH_4^{+} , тяжелых

металлов, углеводородов [Sulwiński et al., 2020; Ахметьева и др., 2011; Rust et al., 2018; Ефремова и др., 2021; Kharanzhevskaya, Sinyutkina, 2021; Russkikh et al., 2021], в некоторых работах также отмечается, что пожары могут оказывать влияние на рост содержания $С_{орг}$ в речных водах [Brown et al., 2015].

Часто степень выгорания поверхности болота носит весьма неоднородный характер, во многом зависит от микрорельефа болота, что в конечном итоге, оказывает влияние на химический состав болотных вод пирогенных участков. Согласно исследованиям [Thompson, Waddington, 2013], мочажины более восприимчивы к выгоранию в сравнении с положительными формами микрорельефа. К примеру, анализ спутниковых данных (Sentinel-2) по участку Васюганского болота, выгоревшему в 2016 г., показал, что для большей части (84 %) пирогенного участка характерно частичное выгорание поверхности и только на 16 % территории полностью выгорела поверхность болота [Синюткина, Гашкова, 2022].

В целом следует отметить, что вопрос влияния микрорельефа поверхности и степени ее выгорания на изменение гидрологических характеристик и химического состава вод болот изучен весьма слабо. Поэтому целью данной работы является оценка постпирогенной динамики гидрохимических показателей болот на микроуровне на примере трех типичных болотных массивов, расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири.

Объекты и методы исследований

Исследования проводились в июле–августе 2022 г. в пределах трех ключевых участков болот (Бакчарское болото, Усть-Бакчарское болото и плоскобугристое болото в районе с. Пангоды), расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири, выгоревших в 2014–2016 гг.

В пределах Бакчарского болота (северо-восточные отроги Васюганского болота) исследования производились на его осушенном северо-восточном участке в междуречье Бакчара и Иксы. Осушение участка проведено с целью лесоразведения в 1980-х гг. сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м. Выгорание участка Бакчарского болота произошло с августа по октябрь 2016 г., общая площадь пожара составила 5,54 км² [Sinyutkina et al., 2020]. Мощность торфяной

залежи исследуемого участка в среднем составляет 2,5–3 м. Торфяная залежь в слое 0–90 см представлена верховым фускум балтикум и магелланикум-торфом, степень разложения в среднем составила 11 %, а в верхних слоях пирогенных участков отмечено увеличение до 13–15 %. Зольность торфа в слое 0–90 см в среднем составила 2 %, а на выгоревших участках было отмечено увеличение до 9–17 % (рис. 1).

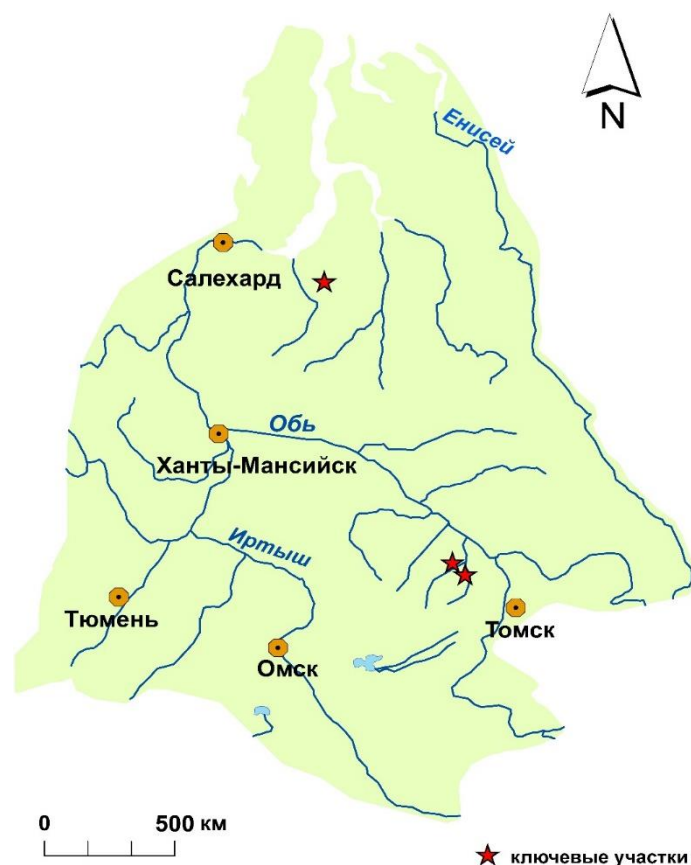


Рис. 1. Схема расположения ключевых участков полевых исследований в 2022 г.

Fig. 1. Location map of field research sites in 2022

Усть-Бакчарское болото расположено на левобережной террасе р. Бакчар и представляет собой небольшой болотный массив площадью 3,5 км² [Sinyutkina, 2021]. Болото было осушено с целью добычи торфа, расстояние между осушительными каналами составляет 40 м. Пожар на Усть-Бакчарском болоте произошел в 2014 г., и выгорела территория площадью 0,5 км². Мощность торфяной залежи составляет 3 м. Торфяная залежь в слое до 90 см представлена верховым балтикум и фускум-торфом, степень разложения в среднем составляет 10–13 %, а на пирогенных участках в слое 0–5 см отмечается увеличение до 20 %.

Зольность торфяной залежи до 90 см в среднем составила 2 % и увеличивалась до 6–4 % в поверхностном слое на выгоревших участках.

В лесотундровой зоне, где отмечается распространение многолетнемерзлых пород, исследования проводились на плоскобугристом болоте площадью 15,8 км² в районе с. Пангоды на междуречье рек Пур и Надым, выгоревшем в 2016 г. Общая площадь выгорания на междуречье составила более 4 тыс. км², площадь контура пожара в пределах болота составила 7 км². Мощность торфяной залежи варьировала от 0 см в мочажинах до 1 м на буграх, толщина выгоревшего слоя по данным полевых описаний 2022 г. составила 10 см.

Торфяная залежь в верхних слоях представлена в основном верховым фускум и балтикум-торфом, который сменяется на древесно-травяной в нижних слоях. Степень разложения торфа варьирует в значительном диапазоне от 5–7 % в слое 0–10 см и до 45 % в приграничном горизонте, а на пирогенном участке степень разложения в поверхностном слое увеличивается до 15 %. Зольность верхних слоев торфяной залежи в среднем составляет 2–6 %, а на выгоревших участках повышается до 7–10 %. Также следует отметить значительное увеличение зольности до 30–45 % в нижних слоях торфяной залежи на буграх. Для плоскобугристого болота было отмечено промерзание торфяной залежи.

Мерзлый слой на фоновой точке в дату проведения полевых исследований отмечен на глубине 50–90 см, со средним значением 64 см (по данным девяти определений). На постпирогенной точке глубина появления мерзлого слоя характеризуется большей пространственной неоднородностью (50–140 см) и большим средним значением в сравнении с фоновой точкой.

Для оценки пространственной неоднородности гидрохимических показателей болот на внутрифациальном уровне в болотных водах было проведено измерение температуры, pH, окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), электропроводности, концентрации O_2 и CO_2 на модельной площадке 5×5 м методом конверта в девяти точках в слое 0–50 см (в слое 0–100 см на Усть-Бакчарском болоте) с привязкой к высоте микрорельефа и определением степени выгорания поверхности. Также проводилось определение коэффициентов фильтрации и отметок уровней болотных вод (УБВ). Определение растворенного O_2 в болотных водах проводилось с использованием оксиметра HI 9146-04 (HANNA Instruments, Германия). Величину pH измеряли с помощью полевого прибора pH-200 (HM Digital, Южная Корея), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) определяли при помощи ORP-200 (HM Digital, Южная Корея). Электропроводность (ЕС) болотных вод измеряли с применением кондуктометра HI 8733 (HANNA Instruments, Германия).

Съемка микрорельефа поверхности проводилась с применением тахеометра SOKKIL CX-105 с шагом 50 см. В качестве средней поверхности принимался интервал высот от –5 см до +5 см. Высоты поверхности более +5 см принимались за кочки, а ниже –5 см характеризовались как мочажины.

Коэффициент фильтрации определен в полевых условиях для верхнего горизонта торфяной залежи путем фиксации времени наполнения пробоотборника заданного объема после откачки воды из скважины. Для этого была организована серия скважин с

установкой ПВХ труб с перфорацией через 5 см. Для проведения опыта использовался пробоотборник Solinst 428 (Solinst Canada Ltd, Канада). Коэффициент фильтрации определялся по слоям 0–50 см и 50–100 см на Бакчарском болоте, в пределах Усть-Бакчарского болота в связи с низким уровнем болотных вод определения проводили в слоях 0–50 см и (или) 0–100 см. На плоскобугристом болоте коэффициент фильтрации также определялся в слое 0–50 см из-за малой мощности торфяной залежи. Расчет коэффициентов фильтрации проводился согласно [Наставления..., 1990]. Итого было проведено 38 определений коэффициентов фильтрации. Всего в пределах Бакчарского болота было выполнено обследование пяти постпирогенных площадок (BF1, BF2, BF3, BF4, BF5) и одной фоновой (Вфон), на Усть-Бакчарском болоте исследования проводились на двух постпирогенных (UBF1, UBF2) и одной фоновой площадке (UBфон), на плоскобугристом болоте у с. Пангоды аналогично проводились исследования на двух постпирогенных (PF1, PF2) и одной фоновой площадке (Рфон).

Результаты

Анализ результатов показал, что в естественных условиях на фоновой площадке Бакчарского болота гидрохимические показатели плавно снижаются от кочки к мочажине, в пробах вод, отобранных в кочках, отмечается более высокое содержание CO_2 (74,1 мг/л), O_2 (3,72 мг/л), величина pH (4,60), ОВП (231 мВ), температура (14,6 °С), ЕС (117 μ S/см). В мочажинах фоновой площадки (Вфон) отмечается минимальное содержание CO_2 (58,3 мг/л), O_2 (0,88 мг/л), величина pH (4,42), ОВП (226 мВ) и температура (12,9 °С), повышается ЕС (112 μ S/см) (табл. 1).

В условиях пирогенной трансформации мочажины Бакчарского болота более подвержены пожару, в итоге в пробах, отобранных в понижениях микрорельефа (средняя поверхность и мочажины), отмечается повышение CO_2 в среднем до 84,5–121 мг/л, величины pH до 4,68. В кочках в условиях их меньшей трансформации под влиянием пожара сохраняется более высокий ОВП (235 мВ), температура (19,5 °С) и содержание O_2 (3,03 мг/л) в водах, и, наоборот, в мочажинах отмечается снижение ОВП (156–176 мВ), O_2 (1,42–1,47 мг/л) и температуры (17,6 °С) за счет существования горелого слоя на поверхности. Следует отметить несколько отличную тенденцию для ЕС вод. Повышение ЕС вод на пирогенных участках отмечается на кочках и в среднем составляет 119 μ S/см, а в понижениях микрорельефа (средняя поверхность и мочажины) величина ЕС снижается до 109 μ S/см.

Существенное снижение уровней вод и более значимая трансформация поверхности Усть-Бакчарского

болота в результате осушения способствовали тому, что на фоновой площадке в отличие от Бакчарского болота повышение концентраций CO_2 (147 мг/л) и O_2 (3,50 мг/л) отмечается в понижениях. И аналогично Бакчарскому болоту в кочках относительно других элементов микрорельефа отмечаются более высокие величины рН вод (4,42), ОВП (271 мВ), ЕС (111 $\mu\text{S}/\text{см}$), а в понижениях они немного снижаются.

На площадках Усть-Бакчарского болота под влиянием пирогенного фактора отмечается снижение содержания CO_2 и O_2 в 1,3–2 раза, увеличение рН до 4,62–

4,69, незначительное снижение ОВП вод (231 мВ) относительно фона и повышение ЕС до 116 $\mu\text{S}/\text{см}$.

Влияние микрорельефа поверхности на исследуемые гидрохимические показатели выражается в более высоком содержании CO_2 (111–116 мг/л) и ЕС (116–121 $\mu\text{S}/\text{см}$) в пробах, отобранных в кочках и на уровне средней поверхности (СП). Также на уровне СП отмечаются более высокое содержание O_2 (1,94 мг/л), величина ОВП (238 мВ), рН (4,71) и температура воды (20,9 °C) (рис. 2).

Таблица 1

Характеристика микрорельефа и средние гидрохимические показатели исследуемых площадок пирогенных участков болот

Table 1

Microtopography and average water chemistry parameters of the key plots in studied fire-event areas within mires

Площадка	CO_2 , мг/л	O_2 , мг/л	рН	ОВП, мВ	ЕС, $\mu\text{S}/\text{см}$	T , °C	УБВ, см	А, см	Н, см	ФА, %
BF1	96,6	1,53	4,53	215	122	20,6	–24	33	0,54	93
BF2	96,9	1,52	4,67	170	101	15,9	–19	42	0,92	67
BF3	107,0	2,13	4,37	186	114	16,9	–20	38	0,90	71
BF4	90,1	1,73	4,52	168	102	17,6	–27	34	0,70	97
BF5	89,3	2,04	4,33	177	108	18,8	–22	35	0,35	74
Вфон	66,2	2,26	4,47	219	109	13,8	–27	44	0	0
UBF1	103,4	2,11	4,62	243	101	25,0	–26	29	0,66	99
UBF2	111,2	1,39	4,69	227	116	15,7	–28	33	0,86	100
УВфон	142,0	3,09	4,39	258	104	15,1	–41	32	0	0
PF1	245,3	0,18	4,32	99	120	14,13	–14	81	5,9	76
PF2	81,5	1,03	3,53	174	62	7,78	–14	61	0,39	78
Рфон	145,7	2,25	3,60	175	77	9,84	–27	56	0	0

Примечание. А – амплитуда высот поверхности, Н – мощность горелого слоя, ФА – степень выгорания площадки 5×5 м.

Note. A is the amplitude of surface heights, H is the thickness of the burnt layer, FA is the degree of burnout of a 5×5 m area.

Анализ изменения гидрохимических характеристик на площадках плоскобугристого болота у с. Пангоды в зависимости от микрорельефа поверхности показал некоторые различия. Так, для фонового участка в пробах, отобранных на бугре, в среднем отмечаются более высокие концентрации CO_2 (165 мг/л), O_2 (6,13 мг/л), рН (3,70), средние величины ОВП сопоставимы на бугре и на уровне средней поверхности, а средняя величина ЕС достоверно не различается между элементами микрорельефа. В понижениях микрорельефа фонового участка CO_2 , O_2 и рН, ОВП снижаются в 1,1–5 раз. На пирогенных участках наоборот в понижениях микрорельефа отмечается повышение содержания CO_2 (165 мг/л), O_2 (0,93 мг/л), ОВП (137–147 мВ), ЕС (86–94 $\mu\text{S}/\text{см}$) и температуры вод (10–11,6 °C). Тогда как на бугре отмечается снижение характеристик в 1,2–2 раза. А величина рН достоверно не различается по элементам микрорельефа. В целом под влиянием пирогенного фактора в водах плоскобугристого болота отмечается повышение в среднем в 1,2–1,7 раза содержания CO_2

(245,3 мг/л), рН (4,32), ЕС (120 $\mu\text{S}/\text{см}$) и температуры (14,1 °C) в сравнении с фоновым участком и, наоборот, отмечается снижение концентрации O_2 (0,18 мг/л) и ОВП (99 мВ) на пирогенных участках.

Сопоставляя все участки, можно сразу отметить различие между фоновыми участками. Это обусловлено тем, что болота таежной зоны осушены, а плоскобугристое болото находится подзоне лесотундры на севере Западной Сибири, что определяет его температурный режим и интенсивность биогеохимических процессов в торфяной залежи. Бакчарское и Усть-Бакчарское болота характеризуются близкими величинами рН вод (4,47 и 4,39 соответственно), ОВП (219 и 258 мВ), ЕС (109 и 104 $\mu\text{S}/\text{см}$) и температуры (13,8 и 15,0 °C). Тогда как в водах плоскобугристого болота в сравнении с болотами таежной зоны отмечается снижение рН до 3,60, ОВП до 175 мВ, ЕС до 77 $\mu\text{S}/\text{см}$, температуры вод до 9,8 °C. Содержание CO_2 в водах плоскобугристого болота, наоборот, сопоставимо с Усть-Бакчарским болотом.

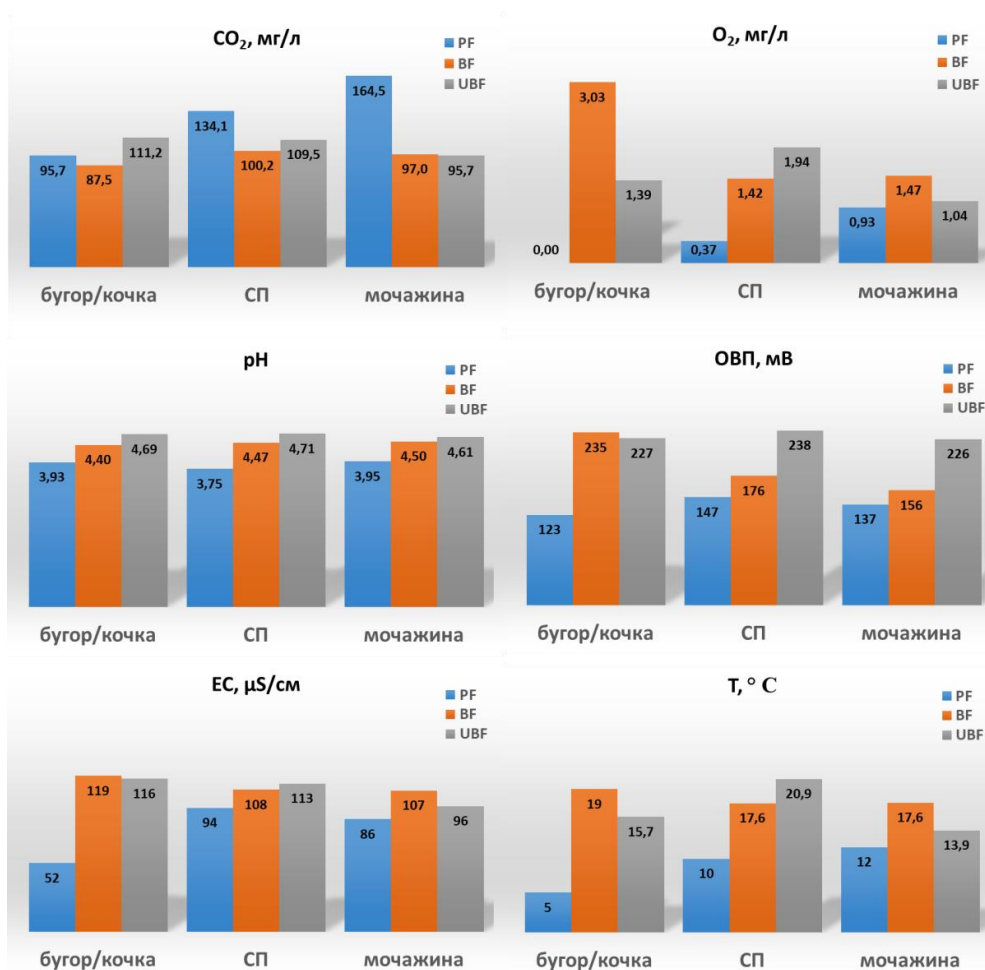


Рис. 2. Динамика гидрохимических характеристик пирогенных участков болот в зависимости от микрорельефа поверхности (бугор/кочка, средняя поверхность, мочажина)

Fig. 2. Dynamics of water chemistry characteristics of fire-event areas in mires in relation with microtopography (hummock, average surface, hollow)

В целом, несмотря на различия исследуемых участков, проведенный кластерный анализ на основании всех исследуемых характеристик химического состава болотных вод показал наличие трех кластеров. В первый кластер выделилась площадка PF1 плоскобугристого болота, которая наиболее пострадала от пожара. Во второй кластер выделились все площадки Усть-Бакчарского болота, а также фоновая площадка Бакчарского болота и BF1. В третий кластер выделились PF2 и фоновая Рфон, а также площадки Бакчарского болота BF2, BF3, BF4, BF5 (рис. 3).

Анализ данных по уровням болотных вод (УБВ) показал, что под влиянием пирогенного фактора отмечается повышение их отметок в результате выгорания поверхности болота и выполаживания микрорельефа. Так, на постпирогенных площадках Бакчар-

ского болота уровни в среднем составляют –22 см, тогда как на фоновой площадке УБВ в среднем снижаются до –27 см ниже поверхности, при этом статистический анализ с применением непараметрического критерия Манна–Уитни не показал значимых различий. Сопоставимые с фоном отметки уровней отмечаются только на площадке BF4, что связано с расположением площадки ближе к водораздельной части. Анализ изменения уровней в зависимости от микрорельефа поверхности показал, что на пирогенных участках отметки УБВ на кочках составили –29...–33 см, тогда как на фоновой площадке отмечается снижение до –37 см. В мочажинах пирогенных участков отметки УБВ составили –10...–22 см, тогда как на фоновой площадке снизились до –20 см. В целом следует отметить схожие вариации уровней на площадках BF4 и Вфон (рис. 4).

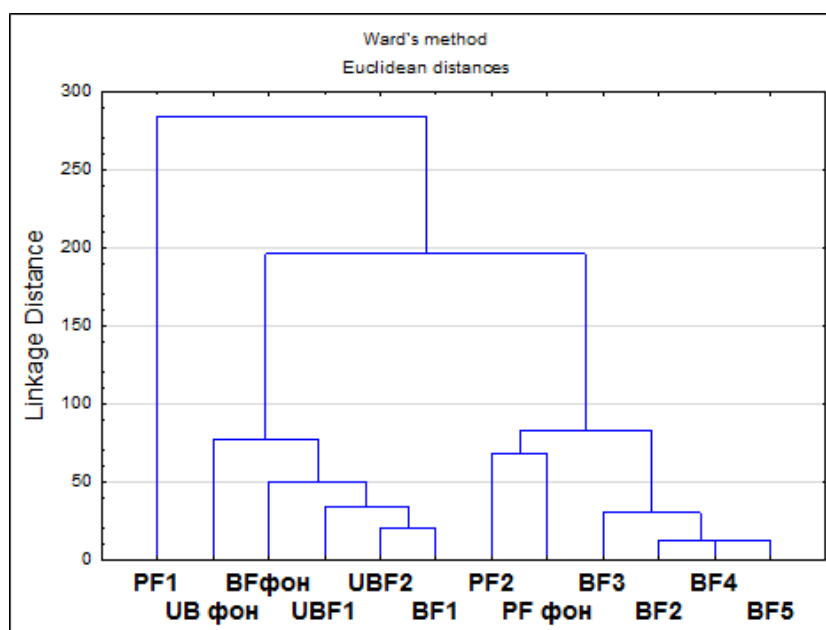


Рис. 3. Дендрограмма гидрохимических показателей пирогенных участков болот

Fig.3. Dendrogram of water chemistry characteristics of fire-event areas in mires

Анализ данных по Усть-Бакчарскому болоту показал достоверные различия в отметках уровней пирогенных площадок и фоновой по критерию Манна–Уитни. Для Усть-Бакчарского болота аналогично отмечается повышение отметок уровней болотных вод на постпирогенных участках. При этом площадка UBF1 характеризуется большей трансформацией поверхности под влиянием пирогенного фактора и осушения и более высокими отметками уровней (–19 см), тогда как фоновая площадка характеризуется снижением уровней в среднем до –41 см. Анализ изменения уровней в зависимости от микрорельефа поверхности показал на кочках снижение уровней до –28 см, на фоновой до –51 см. На средней поверхности на пирогенных участках УВ варьирует от –28 см до –30 см, а на фоновой снижается до –38 см. В мочажинах УВ на UBF1 снизился до –10 см, на UBF2 до –20 см, тогда как на фоновой площадке отмечено более значимое снижение уровней до –35 см.

Анализ результатов по плоскобугристому болоту у с. Пангоды показал одинаковые средние отметки уровней на обоих пирогенных площадках (–14 см), тогда как на фоновой площадке отмечены УВ в 2 раза ниже. Сопоставляя отметки уровней по элементам микрорельефа следует отметить их снижение на буграх до –34 см на пожаре и до –48 см на фоновом участке (Рфон). Положение уровней относительно

средней поверхности в условиях пирогенной нагрузки составляет –16...–23 см и –26 см в фоновых условиях. В мочажинах PF1 и PF2 отметки уровней составили –7 и –10 см соответственно, тогда как на Рфон снизились до –21 см.

Статистический анализ показывает положительную корреляцию уровней с высотой микрорельефа поверхности, что связано с формированием зоны капиллярной каймы над горизонтом уровня болотных вод. Вследствие чего в естественных условиях положение зеркала болотных вод повторяет поверхность болота [Романов, 1961]. В условиях пирогенной нагрузки эта связь нарушается, происходит снижение водоудерживающей способности верхних слоев торфяной залежи, формируется гидрофобный слой на поверхности болота [Kettridge et al., 2014]. Такая закономерность наблюдается на площадке BF2, где отмечается наибольшая мощность горелого слоя, а также на всех пирогенных площадках Усть-Бакчарского болота и плоскобугристого болота у с. Пангоды. Согласно данным [Kettridge et al., 2014] формирование гидрофобного слоя после пожаров на поверхности болота может способствовать снижению величины испарения и поддерживать повышенные отметки уровней, что в последствии приведет к изменению водного баланса в целом и увеличению слоев стока с болота (табл. 2).

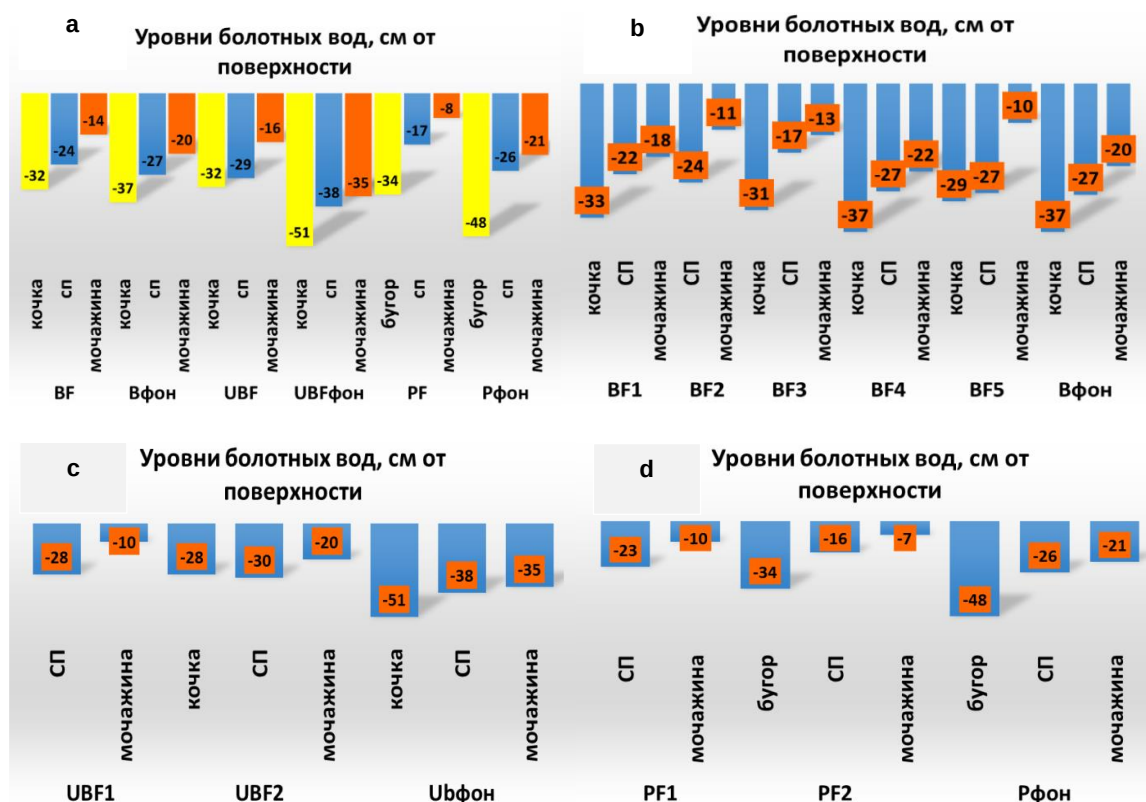


Рис. 4. Вариации уровней болотных вод в зависимости от микрорельефа поверхности пирогенных болот

а – сопоставление уровней по пирогенным и фоновым участкам Бакчарского, Усть-Бакчарского и плоскобугристого болот, б – Бакчарское болото, с – Усть-Бакчарское болото, д – плоскобугристое болото у с. Пангоды

Fig. 4. Water table levels variations in realation with microtopography of pyrogenic sites

а – water table level in pyrogenic and background areas of the Bakchar bog, Ust-Bakchar bog and palsa mire, б – Bakchar bog, с – Ust-Bakchar bog, д – palsa mire near Pangody village

В целом отмеченные закономерности изменения уровней вод на болотах Западной Сибири согласуются с результатами, полученными по выгоревшим болотам европейской территории России [Ахметьева и др., 2020]. В работе [Ахметьева и др., 2020] отмечено, что после пожаров сильно меняются водно-физические свойства торфяной залежи болот, значительно увеличивается коэффициент фильтрации, меняется гидрологический режим болот, повышаются уровни болотных вод. Исследования на выгоревшем болоте в Канаде показали, что после пожара усилилась реакция уровня болотных вод на выпадающие атмосферные осадки [Thompson, Waddington, 2013; Nelson et al., 2021].

В слое 0–50 см торфяной залежи пирогенных участков Бакчарского болота коэффициент фильтрации (k_f) изменяется от 0,054 до 0,85 м/сут (средний 0,26 м/сут), в слое 50–100 см – от 0,27 до 2,09 м/сут (средний 0,56 м/сут).

В сравнении с фоновым участком k_f в слое 0–50 см снижается в среднем в 2 раза.

В целом k_f в слое 0–100 см находится в обратной корреляционной зависимости с плотностью торфа (–0,54) и мощностью горелого слоя (–0,45). Площадки BF3 (0,59 м/сут) и BF5 (0,28 м/сут) характеризуются наименьшей трансформацией фильтрационных свойств, коэффициенты фильтрации в слое 0–50 см на этих площадках близки к фоновым. Коэффициент фильтрации на пирогенных участках Бакчарского болота в слое 0–50 см в сравнении со слоем 50–100 см снижается за счет понижения уровня болотных вод и выгорания поверхности. Наибольшее снижение k_f в верхних слоях отмечается на некоторых участках (BF1, BF2), где наблюдается более мощный горелый слой.

В целом проведенные исследования согласуются с данными полученными на выгоревших болотах северной Англии, которые показали, что после пожаров коэффициенты фильтрации были значительно ниже на 12–25 % [Holden et al., 2013].

Дальнейший анализ наших данных по болотам Западной Сибири показал, что коэффициент фильтрации

(k_f) значительно варьирует по территории исследуемых участков болот. Более высокие значения коэффициентов фильтрации отмечены на фоновых участках, в слое 0–50 см торфяной залежи Бакчарского болота k_f в среднем составляет 0,50 м/сут, в пределах Усть-Бакчарского болота снижается до 0,43 м/сут, а на плоскобугристом болоте он снижается в 7 раз (0,061 м/сут), и, наоборот, пирогенный участок характеризуется повышенными коэффициентами фильтрации.

Наши данные показывают, что спустя около 30 лет сохраняется влияние пожара на водно-физические свойства торфяной залежи, а также на химический состав вод. На фоновой площадке Бакчарского

болота отмечено существенное повышение коэффициентов фильтрации в слое 50–100 см в сравнении с верхним слоем (Вфон, $k_f = 11$ м/сут). По результатам ретроспективного анализа космоснимков было отмечено, что данный участок также выгорел (примерно в 1990-х гг.), это и предопределило снижение водопроницаемости верхнего 0–50 см слоя. Исследования фильтрационных свойств элементов микрорельефа поверхности пирогенных участков Бакчарского болота показали, что в связи с трансформацией верхних слоев торфяной залежи под влиянием осушения на кочках, более высокие коэффициенты фильтрации отмечаются на уровне средней поверхности и в мочажинах (0,29–0,35 м/сут).

Таблица 2

Матрица коэффициентов корреляции уровня болотных вод с мощностью горелого слоя и высотой микрорельефа поверхности болота

Table 2

Correlation matrix of water table levels with the burnt layer thickness and the height of the mire surface

Площадка	Мощность горелого слоя	Высота микрорельефа
BF1	0,46	0,43
BF2	–0,34	–0,50
BF3	0,71	0,41
BF4	0,90	0,41
BF5	0,49	0,42
Вфон	нет	0,57
UBF1	0,31	–0,31
UBF2	0,18	0,27
UBфон	нет	0,56
PF1	0,43	0,36
PF2	–0,01	–0,55
Рфон	нет	0,27

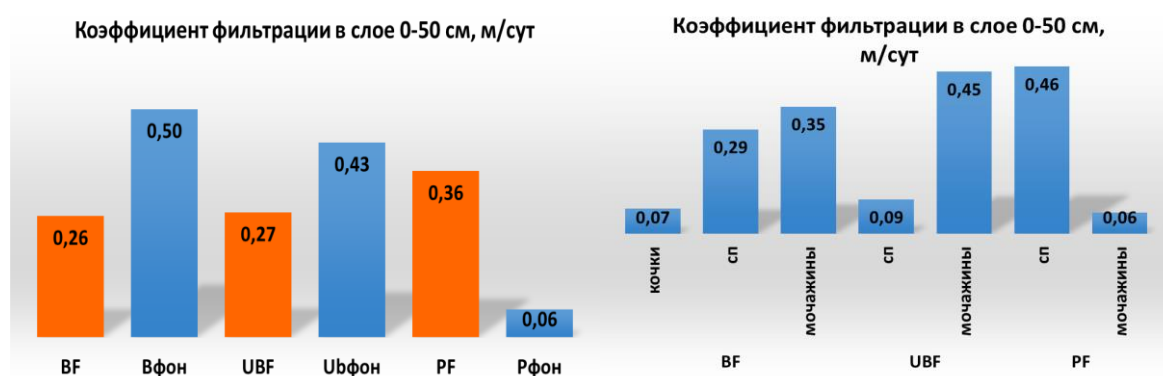


Рис. 5. Динамика коэффициентов фильтрации пирогенных и фоновых участков болот

Fig. 5. Hydraulic conductivity variation in fire-event and background areas of mires

На пирогенных площадках Усть-Бакчарского болота коэффициент фильтрации в слое 0–50 см составил 0,27 м/сут, что в 1,6 раза ниже, чем на фоновой площадке, но сопоставимо со значениями, полученными в среднем для пирогенных площадок Бакчарского болота. Исследования показали более высокий

коэффициент фильтрации в мочажинах (в среднем 0,45 м/сут), тогда на уровне средней поверхности отмечается их снижение в 5 раз. Статистический анализ не показал значимой корреляции k_f с плотностью верхнего слоя торфа и мощностью горелого слоя. Причиной этого, вероятно, является существенное

снижение уровней болотных вод под влиянием осушения, в результате чего произошла значительная трансформация порового пространства деятельного горизонта торфяной залежи, что и является ведущим фактором, определяющим изменения фильтрационных свойств. Так на UBF2 отмечается резкое увеличение плотности торфа в слое 0–100 см, в результате при полевых работах после выпадения атмосферных осадков было отмечено формирование двух горизонтов уровней болотных вод.

В торфяной залежи пирогенного участка плоскобугристого болота в лесотундре коэффициент фильтрации оказался в 6 раз выше, чем на фоновом участке. В целом коэффициент фильтрации в слое 0–50 см на пирогенных площадках болота у с. Пангоды варьирует от 0,034 до 1,24 м/сут, что сопоставимо с результатами, полученными в таежной зоне. Коэффициент фильтрации в слое 0–50 см торфяной залежи фоновой ненарушенной пожаром площадки оказался существенно ниже и составил 0,061 м/сут. Такая закономерность, вероятно, определяется распространением многолетнемерзлых пород и процессами промерзания болота, тогда как на пирогенных участках существенно меняется термический режим и происходит процесс оттаивания торфяной залежи, в результате коэффициент фильтрации увеличивается. Отмечены более высокие коэффициенты фильтрации на уровне средней поверхности, а в мочажинах они снижаются. Статистический анализ показал тесную корреляционную связь k_f с плотностью верхних слоев ($r = -0,55$) и слабую корреляцию с мощностью горелого слоя ($-0,31$).

Заключение

Таким образом, анализ фоновых площадок показал исходные различия в характеристиках химического состава болотных вод. Болота таежной зоны

осушены, в результате в пробах отмечено более высокое содержание O_2 , величины pH, ОВП, ЕС, а также температура за счет более южного расположения. Плоскобугристое болото не подвергалось осушению, поэтому в болотных водах отмечен более низкий pH и ЕС, но содержание CO_2 выше за счет активных процессов разложения растительных остатков в условиях промывного режима. Под влиянием пирогенного фактора и в связи с формированием гидрофобного слоя на поверхности отмечается снижение содержания в водах O_2 , величин ОВП, отмечается повышение pH, ЕС, концентрации CO_2 и температуры. В фоновых условиях исследуемые характеристики плавно снижаются от кочки к мочажине, в условиях пирогенного фактора вариация pH, ЕС, Т, ОВП, CO_2 , O_2 в водах сильно зависит от степени выгорания и исходной трансформации поверхности болота под влиянием осушения.

Под влиянием пирогенного фактора отметки уровней повышаются, более высокие уровни отмечены на плоскобугристом болоте (–14 см), на Бакчарском и Усть-Бакчарском болотах уровни в среднем составляют –22 см и –27 см соответственно. С ростом мощности горелого слоя корреляция между высотой поверхности и положением уровней воды снижается, так как нарушаются водоудерживающая способность верхнего слоя торфяной залежи.

Коэффициенты фильтрации в торфяной залежи выгоревших болот таежной зоны снижаются за счет нарушения пористой структуры деятельного горизонта. В лесотундре, наоборот, отмечено увеличение коэффициентов фильтрации, что связано с трансформацией термического режима болота под влиянием пирогенного фактора и оттаиванием торфяной залежи.

Список источников

- Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Михайлова А.В. Изменение химического состава болотных вод после пожаров 2010 года (на примере водосбора Иваньковского водохранилища) // Труды Инсторфа. 2011. № 4 (57). С. 12–16.
- Ахметьева Н.П., Михайлова А.В., Кричевец Г.Н., Беляев А.Ю. Торфяные болота центральных областей Европейской части России: их трансформация за последние 100 лет. М. : ГЕОС, 2020. 134 с
- Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В. Изменение изотопного состава азота в процессе трансформации опада растений-торфообразователей на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот // Почвы и окружающая среда. 2023. № 6 (4). e238. doi: 10.31251/pos.v6i4.238
- Ефремова Т.Т., Пименов А.В., Ефремов С.П., Аврова А.Ф., Ефимов Д.Ю. Опыт оценки воздействия лесо-торфяных пожаров на гидрохимические свойства эвтрофных болот // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2021. № 5. С. 537–546.
- Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Л. : Гидрометеиздат, 1990. Вып. 8. 361 с.
- Романов В.В. Гидрофизика болот. Л. : Гидрометеиздат, 1961. 360 с.
- Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Оценка состояния и геоинформационное моделирование постпирогенной динамики участка Большого Васюганского болота // Региональные геосистемы. 2022. № 46 (3). С. 366–377.
- Харанжевская Ю.А. Оценка постпирогенной трансформации водно-теплового режима участка Васюганского болота (Западная Сибирь) // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», 29 августа – 3 сентября 2022, Барнаул. Барнаул, 2022. Т. 2. С. 154–157.
- Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Динамика химического состава вод постпирогенных болот в условиях лесотундры и тайги Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 06. С. 193–203.

- Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quinton W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 782. 15 August. 146841. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841
- Brown L.E., Holden J., Palmer S.M., Johnston K., Ramchunder S.J., Grayson R. Effects of fire on the hydrology, biogeochemistry, and ecology of peatland river systems // *Freshwater Science*. 2015. No. 34 (4). P. 1406–1425. doi: 10.1086/683426
- Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. 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
- Holden J., Wearing C., Palmer S., Jackson B., Johnston K., Brown L.E. Fire decreases near-surface hydraulic conductivity and macropore flow in blanket peat // *Hydrological Processes*. 2013. No. 28 (5). P. 2868–2876. doi: 10.1002/hyp.9875
- Kettridge N., Thompson D.K., Waddington J.M. Impact of wildfire on the thermal behavior of northern peatlands: Observations and model simulations // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2012. No. 117 (G2). n/a–n/a. doi: 10.1029/2011jg001910
- Kettridge N., Humphrey R.E., Smith J.E., Lukenbach M.C., Devito K.J., Petrone R.M., Waddington J.M. Burned and unburned peat water repellency: Implications for peatland evaporation following wildfire // *Journal of Hydrology*. 2014. No. 513. P. 335–341
- Kharanzhevskaya Yu. A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. No. 928. 012006. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012006
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. No. 50. P. 1953–1974. doi: 10.1007/s13280-020-01490-x, 2021
- Nelson K., Thompson D., Hopkinson C., Petrone R., Chasmer L. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands // *Science of The Total Environment*. 2021. No. 769. 145212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212
- Russkikh I.V., Strel'nikova E. B., Serebrennikova O.V., Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire composition of lipids in waters and plants of Great Vasyugan Mire // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. No. 928. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012010
- Rust A.J., Hogue T.S., Saxe S., McCray J. Post-fire water-quality response in the western United States // *International Journal of Wildland Fire*. 2018. No. 27 (3). P. 203. doi: 10.1071/wf17115
- Sherwood J.H., Kettridge N., Thompson D.K., Morris P.J., Silins U., Waddington J.M. Effect of drainage and wildfire on peat hydrophysical properties // *Hydrological Processes*. 2013. No. 27 (13). P. 1866–1874. doi: 10.1002/hyp.9820
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K., Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 408. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
- Sinyutkina A.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
- Sulwiński M., Mętrak M., Wilk M., Suska-Malawska M. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: Long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen // *Science of The Total Environment*. 2020. No. 746. 141142. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142
- 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.014

References

- Akhmeteva N.P., Lapina E.E., Mikhailova A.V. Changes in the chemical composition of mire waters after the fires of 2010 (on the example of the watershed of the Ivankovo reservoir) // *Proceedings of Instorf*. 2011. No. 4 (57). pp. 12–16. In Russian.
- Akhmet'yeva N.P., Mikhaylova A.V., Krichevets G.N., Belyayev A.Yu. *Torfanyye bolota tsentral'nogo okhvata chastey Rossii: ikh transformatsiya za posledniye 100 let* [Peat bogs in the central regions of the European part of Russia: their transformation over the past 100 years]. Moscow: GEOS, 2020. 134 p. In Russian
- Golovatskaya E.A., Nikonova L., Kalashnikova D.A., Simonova G.V. Changes in the nitrogen isotopic composition during the transformation of peat-forming plant litter at dried and post-pyrogenic sites of oligotrophic bogs. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. 6(4). e238. doi: 10.31251/pos.v6i4.238 In Russian
- Efremova T.T., Pimenov A.V., Efremov S.P., Avrova A.F., Efimov D.Yu. Experience in assessing the impact of forest-peat fires on the hydrochemical properties of eutrophic bogs // *Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Biological series*. 2021. No. 5. pp. 537–546. In Russian
- Nastavleniye gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam* [Instructions for hydrometeorological stations and posts]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. V. 8. 361 p. In Russian
- Romanov V.V. *Gidrofizika bolot* [Hydrophysics of peatlands]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961. 360 p. In Russian
- Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. *Otsenka sostoyaniya i geoinformatsionnoye modelirovaniye postpyrogennoy dinamiki uchastka Bol'shogo Vasyuganskogo bolota* [State assessment and GIS-modeling of post-pyrogenic dynamics of the Great Vasyugan Mire area] // *Regional Geosystems*. 2022. 46(3). pp. 366–377. In Russian
- Kharanzhevskaya Yu.A. *Otsenka postpyrogennoy transformatsii vodno-teplovogo rezhima uchastka Vasyuganskogo bolota (Zapadnaya Sibir')* [Assessment of post-pyrogenic transformation of the water-thermal regime of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia)] // *Materials of the IV All-Russian scientific conference with international participation “Water and environmental problems of Siberia and Central Asia”*, August 29 – September 3, 2022, Barnaul. Barnaul, 2022. T 2. pp. 154–157. In Russian
- Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Wildfire-related changes of mire water chemistry in forest-tundra and taiga zones of Western Siberia // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023. V. 334. № 6. pp. 193–203. In Russian

Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quinton W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 782. 15 August. 146841 doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841 In Russian

Brown L.E., Holden J., Palmer S.M., Johnston K., Ramchunder S.J., Grayson R. Effects of fire on the hydrology, biogeochemistry, and ecology of peatland river systems // *Freshwater Science*. (2015). 34(4). 1406–1425. doi: 10.1086/683426

Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S. M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia // *Quaternary Science Reviews*. 2020. № 244. 106495. doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106495

Holden J., Wearing C., Palmer S., Jackson B., Johnston K., Brown L. E. Fire decreases near-surface hydraulic conductivity and macropore flow in blanket peat // *Hydrological Processes*. 2013. 28(5). 2868–2876. doi: 10.1002/hyp.9875

Kettridge N.; Thompson D.K.; Waddington J.M. Impact of wildfire on the thermal behavior of northern peatlands: Observations and model simulations // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012. 117(G2), n/a–n/a. doi: 10.1029/2011jg001910

Kettridge N., Humphrey R.E., Smith J.E., Lukenbach M.C., Devito K.J., Petrone R.M., Waddington J.M. Burned and unburned peat water repellency: Implications for peatland evaporation following wildfire // *Journal of Hydrology*. 2014. № 513. pp. 335–341.

Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 928. 012006. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012006

Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C., and Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. 50. pp. 1953–1974. doi: 10.1007/s13280-020-01490-x

Nelson K., Thompson D., Hopkinson C., Petrone R., Chasmer L. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands // *Science of The Total Environment*. 2021. 769. 145212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212

Russkikh I.V., Strel'nikova E. B., Serebrennikova O.V., Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire composition of lipids in waters and plants of Great Vasyugan Mire // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 928. 2021. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/928/1/012010

Rust A. J., Hogue T. S., Saxe S., McCray J. Post-fire water-quality response in the western United States // *International Journal of Wildland Fire*. 2018. 27(3). 203. doi: 10.1071/wf17115

Sherwood J.H., Kettridge N., Thompson D.K., Morris P.J., Silins U., Waddington J.M. Effect of drainage and wildfire on peat hydro-physical properties // *Hydrological Processes*. 2013. 27(13). 1866–1874. doi: 10.1002/hyp.9820

Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronatova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Vishnyakova E.K. Kharanzhevskaya Yu.A. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2020. Vol. 408. 012037. doi: 10.1088/1755-1315/408/1/012037

Sinyutkina A.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. № 205. 105464. doi: 10.1016/j.catena.2021.105464

Sulwiński M., Mętrak M., Wilk M., Suska-Malawska M. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: Long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen // *Science of The Total Environment*. 2020. 746. 141142. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142

Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms // *Journal of Hydrology*. 2013. 486. 48–56. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.01.014

Информация об авторах:

Харанжевская Ю.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия.

E-mail: kharan@yandex.ru

Синюткина А.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Томск, Россия.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kharanzhevskaya Yu.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies, RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia.

E-mail: kharan@yandex.ru

Sinyutkina A.A., Cand. Sci. (Geography), Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies, RAS, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russia.

E-mail: ankalaeva@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.01.2024; одобрена после рецензирования 12.03.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 30.01.2024; approved after reviewing 12.03.2024; accepted for publication 02.06.2025