

УДК 556.561

ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ПОСТПИРОГЕННЫХ БОЛОТ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОТУНДРЫ И ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Харанжевская Юлия Александровна¹,
kharan@yandex.ru

Синюткина Анна Алексеевна¹,
ankalaeva@yandex.ru

¹ Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа –
филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН,
Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки изменений химического состава природных вод под влиянием пирогенного фактора.

Цель: исследование химического состава вод постпирогенных участков болот в лесотундровой и таежной зонах Западной Сибири, анализ условий его формирования и закономерностей пространственной вариации в зависимости от степени выгорания поверхности.

Объекты: Васюганское болото, Усть-Бакcharское болото, плоскобугристое болото у с. Пангоды.

Методы. Лабораторное определение химического состава болотных вод проводилось методами титриметрии, спектрофотометрии, пламенной фотометрии в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН. Анализ содержания в пробах Cu, Pb, Cd, Zn, P, Mn производился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в Химико-аналитическом центре «Глазма». Статистическая обработка данных проводилась с применением непараметрического критерия Уилкоксона, кластерного анализа и метода главных компонент.

Результаты. Исследования показали, что индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав болотных вод является повышение pH, минерализации и концентраций K^+ , SO_4^{2-} , а также Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , $Fe_{общ}$, NO_3^- , P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb. В процессе восстановления болота после пожара и минерализации верхних выгоревших слоев торфяной залежи в водах отмечается постепенное повышение концентраций NH_4^+ , $С_{орг}$ и ХПК. Анализ данных по химическому составу показал более в 4–16 раз – концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , NO_3^- , $Fe_{общ}$, HCO_3^- , $С_{орг}$ и ХПК, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb в водах плоскобугристого болота в лесотундре в сравнении с пробами и вод, отобранными на выгоревших участках верховых болот таежной зоны Западной Сибири. Факторный анализ показал, что ведущим фактором формирования химического состава вод является степень выгорания поверхности, температура воды и уровни болотных вод. Таким образом, исследования показали, что химический состав вод постпирогенных болот во многом зависит от степени выгорания поверхности, исходных генетических особенностей болота и времени, прошедшего после пожара.

Ключевые слова:

Болотные воды, химический состав, пирогенный фактор, влияние, Западная Сибирь.

Введение

Природные пожары являются одной из глобальных экологических проблем. Современные климатические изменения увеличивают продолжительность и тяжесть пожароопасного периода, поэтому болота становятся более уязвимы для природных пожаров, увеличивается их частота и интенсивность, что является особенно актуальным для северных широт России в целом и для Сибири в частности [1–4].

Природные пожары оказывают существенное влияние на химический состав природных вод, а характер их постпирогенного изменения зависит от многих факторов, таких как гидрологический режим территории, топография, геология, размер пожара, интенсивность пожара [5, 6]. В результате горения торфа в атмосферный воздух выделяются SO_2 , NO_2 , CO , O_3 , а также попадает целый ряд ионов ($NO_3^- > SO_4^{2-} > Na^+ > Cl^- > Ca^{2+} > K^+ > F^- > Mg^{2+}$) и тяжелых металлов ($Zn > Al > Fe > Cr > Pb > Cu > Ni > Cd$) в виде частиц размером менее 10 микрон [7].

Пожары на болотах приводят к изменению термического режима, на выгоревших участках происходит более быстрое стайвание снега [2], значимым последствием че-

го является увеличение водного стока. В результате пожара отмечается также снижение эвапотранспирации и образование особого гидрофобного слоя на поверхности, в результате чего увеличивается эрозия и сток минеральных веществ с водосбора [8]. Исследования показывают, что после пожара в водах отмечается увеличение концентрации главных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) и анионов сильных кислот (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-), ионов аммония, общего азота и фосфора, тяжелых металлов, углеводов [9–21]. Наибольшие изменения химического состава вод отмечаются в первые годы после пожара, однако негативная ситуация может сохраняться в течение трех и более лет после пожара [8, 13, 16, 21]. Исследования, проведенные на участке низинного болота в Бейбжанском национальном парке в Польше, показали, что в водах спустя 12 лет после пожара отмечается более высокий pH, повышенные концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , а на некоторых участках также PO_4^{3-} и Fe^{3+} [21].

Таким образом, проблема пожаров на болотах и их экологических последствий является весьма актуальной. В настоящее время химический состав болотных вод Западной Сибири достаточно хорошо изучен [22–24], имеются данные о состоянии растительного

покрова выгоревших болот [25]. Однако следует отметить слабую изученность постпирогенной трансформации химического состава вод болот региона. Целью данной работы является исследование химического состава вод постпирогенных участков болот в лесотундровой и таежной зонах Западной Сибири, анализ условий формирования и закономерностей пространственной вариации в зависимости от степени выгорания поверхности.

Объекты и методика исследования

Исследования проводились в пределах трех ключевых участков болот (Васюганское болото, Усть-Бакчарское болото и плоскобугристое болото в районе с. Пангоды), расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири, выгоревших в 2014–2016 гг. (табл. 1, рис. 1). Отбор проб болотных вод производился на северо-восточном участке Васюганского болота на междуречье Бакчара и Иксы. Мощность торфяной залежи исследуемого участка в среднем составляет 2,5–3 м. Осушение участка Васюганского болота проведено с целью лесоразведения в 1980-х гг. сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м. Выгорание участка Васюганского болота произошло с августа по октябрь 2016 г., общая площадь пожара составила 5,54 км². Наибольшее выгорание растительности и поверхности болота по данным полевых описаний в первые годы после пожара наблюдалось преимущественно вблизи осушительных каналов, где торфяная залежь выгорела на 5–15 см, на остальной территории наблюдалось частичное выгорание поверхности болота в слое до 5 см [26]. Полевые описания в 2022 г. показали, что произошла осадка поверхности болота, в результате чего горелый слой составляет всего 1–1,5 см. Торфяная залежь в слое 0–90 см представлена верховым балтикум-, магелланикум- и фускум-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 %.

Усть-Бакчарское болото расположено на левобережной террасе р. Бакчар и представляет собой небольшой болотный массив площадью 3,5 км², в том числе осушенная часть составляет 1,6 км² [27]. Мощность торфяной залежи составила 3 м. Болото было осушено с целью добычи торфа, расстояние между осушительными каналами составляет 40 м. Пожар на Усть-Бакчарском болоте произошел в 2014 г. – выгорела территория площадью 0,5 км². Мощность горелого слоя по данным полевых описаний 2016 г. составила около 10 см, а при отборе проб в 2022 г. мощность горелого слоя в результате его деградации составила около 1–1,5 см. 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 увеличилась до 6–14 % в поверхностном слое на выгоревших участках.



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

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

Таблица 1. Описание пунктов отбора проб болотных вод в 2022 г.

Table 1. Water sampling points in 2022

Участок Site	Дата отбора проб Water sampling date	Координаты Coordinates	Степень выгорания поверхности на площадке 5×5 м, % Degree of surface burnout on the site 5×5 m, %	Уровни болотных вод, см Water table level, cm
BF1	27.07.2022	56°52' 46,9", 82°41' 04,4"	93	–21
BF2	28.07.2022	56°53' 14,3", 82°40' 59,8"	67	–17
BF3	27.07.2022	56°52' 56,4", 82°40' 44,9"	71	–12
BF4	28.07.2022	56°53' 16,8", 82°40' 26,4"	97	–16
BF5	20.07.2022	56°53' 18,6", 82°40' 36,7"	74	–22
BF6	29.07.2022	56°51' 55,2", 82°41' 42,3"	0	–15
RGфон	20.07.2022	56°53' 25,8", 82°40' 50,5"	0	–15
UBF1	01.08.2022	57°34' 39,5", 82°16' 21,6"	99	–10
UBF2	01.08.2022	57°34' 35,5", 82°15' 59,6"	100	–14
UBFфон	31.07.2022	57°34' 41", 82°16' 25,9"	0	–30
PF1	13.08.2022	65°52' 20,7", 74°58' 09,2"	76	–19
PF2	15.08.2022	65°52' 11,0", 74°56' 27,9"	78	–10
Рфон	12.08.2022	65°52' 17,9", 74°57' 48,1"	0	–14

В лесотундровой зоне 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 в верхних слоях 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.

Отбор проб болотных вод производился в июле–августе 2022 г. из скважины в торфе, организованной непосредственно перед отбором проб. Отбор проб на Васюганском и Усть-Бакчарском болотах производился в пределах выгоревших и аналогичных им ненарушенных пирогенным фактором сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтах. Отбор проб на плоскобугристом болоте у с. Пангоды проводился в осоково-сфагновых мочажинах в связи с промерзанием бугров. В пределах каждого ключевого участка отбор проб производился на серии площадок 5×5 м с разной степенью выгорания поверхности, а фоновые участки выбирались за пределами контура пожара.

Определение химического состава болотных вод (табл. 2) проводилось в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН и в Химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск). Определение растворенного O₂ в болотных водах проводилось с использованием оксиметра Oxi 3205 фирмы WTW (Германия). Величину pH измеряли с помощью полевого прибора pH-200 фирмы HM Digital (Южная Корея), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) определяли ORP-200 фирмы HM Digital (Южная Корея). Электропроводность (ЕС) болотных вод измеряли с применением кондуктометра HI8733 фирмы HANNA Instruments (Германия).

Методика исследований включала кластерный анализ и оценку значимости различий в химическом составе вод постпирогенных и фоновых участков болот по непараметрическому критерию Уилкоксона при уровне значимости $p=5\%$ в Statistica 10. Критерий основан на ранжировании величины изменения признака (n), абсолютные значения ненулевых разностей (n) упорядочиваются в порядке возрастания и определяются их ранги (R). Критерий рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{\left| T - \frac{n(n+1)}{4} \right|}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$$

где T – статистика критерия, равная наименьшему значению суммы рангов для отрицательных (R_n) и положительных разностей (R_p) [28].

Таблица 2. Описание методов определения химического состава болотных вод

Table 2. Analytical methods

Компонент Component	Метод/Method
Ca ²⁺	Титриметрия/Titrimetry
Mg ²⁺	
K ⁺	Пламенная фотометрия Flame photometry (PFA-378, Russia)
Na ⁺	
SO ₄ ²⁻	Спектрофотометрия Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
Cl ⁻	Титриметрия/Titrimetry
NH ₄ ⁺	Спектрофотометрия Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
Fe _{total}	
HCO ₃ ⁻	Титриметрия/Titrimetry
NO ₃ ⁻	Спектрофотометрия Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
C _{орг} /DOC	Спектрофотометрия Spectrophotometry (PE-5400VI, Russia)
ХПК/COD	Титриметрия/Titrimetry
CO ₂	
P	
Mn	
Zn	
Cd	
Cu	Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS (ELANDRC-e, USA)
Pb	

Кластерный анализ проводили с использованием иерархического метода Уорда с расчетом евклидова расстояния. Анализ условий формирования химического состава вод постпирогенных болот осуществлялся методом главных компонент (Principal component analysis) с расчетом факторных нагрузок и построением графика каменной осыпи.

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав болотных вод является повышение pH, минерализации и концентраций K⁺, SO₄²⁻, а также Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, Fe_{общ}, NO₃⁻, P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb (рис. 2). В процессе восстановления болота после пожара и минерализации растительных остатков в верхних выгоревших слоях торфяной залежи в водах отмечается постепенное повышение концентраций NH₄⁺, C_{орг} и ХПК, что согласуется с проведенными ранее исследованиями [13, 29].

Отбор проб на северо-восточном участке Васюганского болота в июле 2017 г., через год после пожара, показал, что под влиянием пирогенного фактора в болотных водах наиболее выгоревшего участка отмечается снижение биогенных NH₄⁺, NO₃⁻ и органических веществ (C_{орг} и ХПК) и повышение минеральных веществ K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Fe_{общ}, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, а также накопление тяжелых металлов Zn, Cu, Pb, Cd [28].

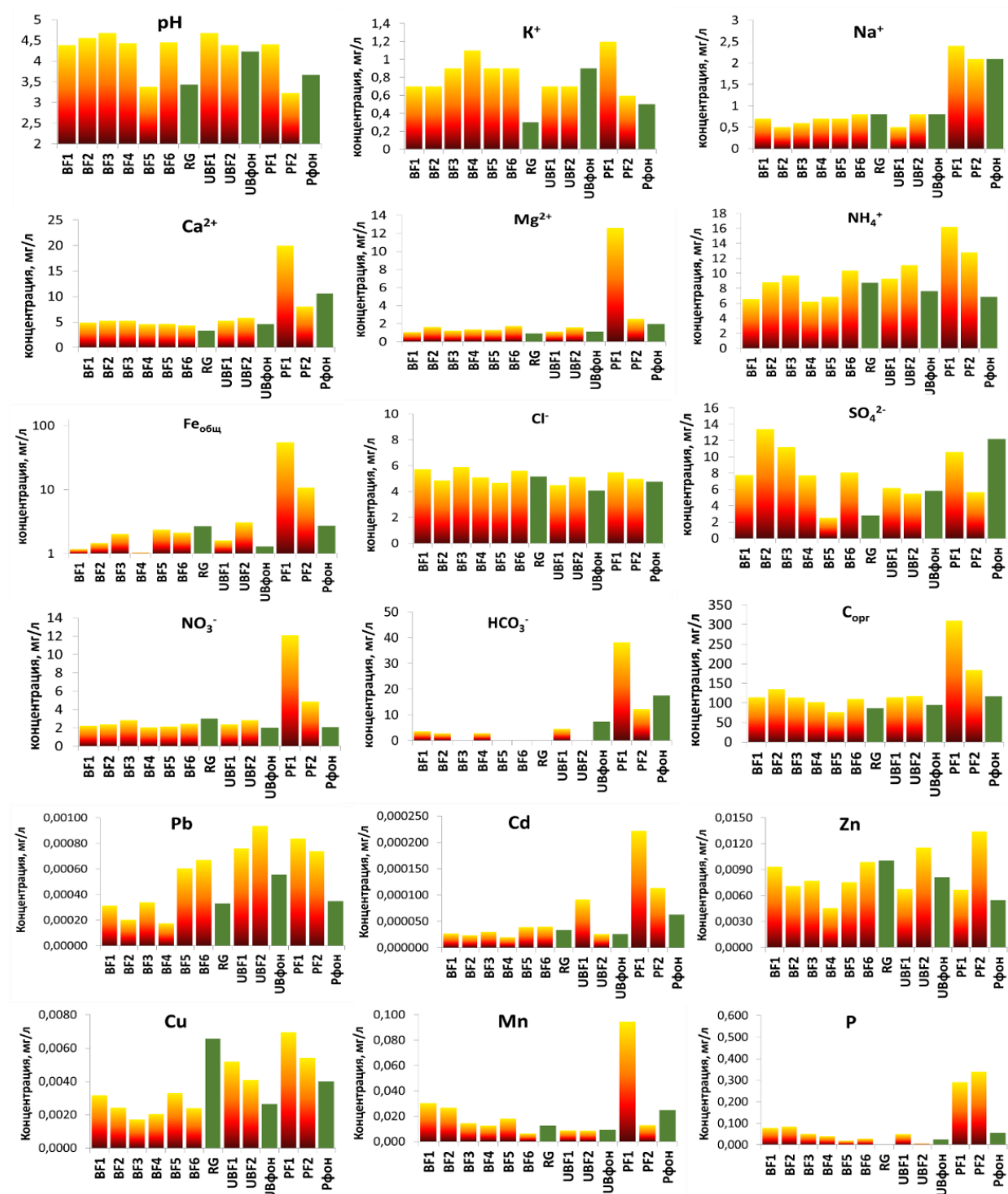


Рис. 2. Вариация химического состава вод постпирогенных участков Васюганского (BF, RG), Уст-Бакчарского (UB) и плоскобугристого болот у с. Пангоды (PF)

Fig. 2. Variation in water chemistry of post-fire areas within Great Vasyugan Mire (BF, RG), Ust-Bakchar bog (UB) and palsa mire near Pangody village (PF)

Повышение концентраций K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Fe_{общ}$, Mn , P , Zn , Cu , Pb , Cd в водах согласуется с ростом содержания этих компонентов в верхних слоях торфяной залежи участка Васюганского болота [30, 31]. Согласно данным [32] после пожара на поверхности образуется особый гидрофобный слой, который богат лабильными формами органического вещества, что приводит к росту $C_{орг}$ в водах. Исследования на выгоревшем в 2010 г. участке болота Га-

лицкий мох показали существенное – в 3 раза – увеличение минерализации и pH вод (до 7,2), а также концентраций Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , $Fe_{общ}$, HCO_3^- , Cl^- , P , снизилась цветность вод. В последующие годы отмечалось снижение концентраций, но в 2015 г. отмечено содержание SO_4^{2-} в 5 раз выше фона, фосфора – в 2 раза, ионов NO_3^- и NH_4^+ – в 3 раза, а величина pH достигла фонового значения [13].

Анализ наших данных по химическому составу за 2022 г. показал более высокие – в 4–16 раз – концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , NO_3^- , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, HCO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ и ХПК, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb в водах постпирогенных участков плоскобугристого болота у с. Пангоды в лесотундровой зоне в сравнении с пробами, отобранными на участках верховых болот таежной зоны Западной Сибири, что, вероятно, определяется генетическими особенностями и малой мощностью торфяной залежи болотного массива в зоне распространения многолетнемерзлых пород, а также степенью выгорания поверхности. В пробах болотных вод, отобранных в таежной зоне в пределах постпирогенных участков Васюганского и Усть-Бакчарского болота, можно отметить сопоставимые средние концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- , HCO_3^- , Cl, $\text{C}_{\text{орг}}$ и минерализации вод. При этом в водах Васюганского болота отмечено более высокое содержание K^+ , SO_4^{2-} , P, Mn и величины ХПК вод, и наоборот в водах Усть-Бакчарского болота наблюдаются повышенные концентрации NH_4^+ , HCO_3^- , Cu, Zn, Cd, Pb.

Кластерный анализ, проведенный на основе всех отобранных проб болотных вод, показал существенные различия в химическом составе исследуемых объектов, разделив их на четыре кластера. В первый и во второй кластер выделились пробы PF1 и PF2, отобранные на выгоревшем участке плоскобугристого болота и характеризующиеся резкими различиями в химическом составе вод. В третий кластер выделились все пробы, отобранные в пределах Усть-Бакчарского болота, а также три пробы с Васюганского болота (BF3, BF4, BF6) и фоновая проба с плоскобугристого болота (PFфон), что свидетельствует о сопоставимых характеристиках состава вод. При этом проба BF6 была отобрана на участке, выгоревшем, по данным анализа космоснимков, в 1990-е гг. с практически полным отсутствием следов пожара. Следует отметить, что в отдельный подкластер выделились проба BF4 с наиболее выгоревшего участка Васюганского болота и фоновая проба PFфон с естественной части плоскобугристого болота у с. Пангоды. В четвертый кластер выделились четыре пробы с Васюганского болота.

Анализируя данные по Васюганскому болоту, можно отметить статистически значимые отличия по непараметрическому критерию Уилкоксона ($Z=2,24$, $p<0,025$) в сравнении с фоном в химическом составе вод участка BF4, который вошел в первый кластер и характеризуется наибольшей степенью выгорания поверхности (около 97 %). В водах отмечается повышение величины pH вод и в 1,5–4 раза относительно фона (RG) концентраций K^+ до 1,1 мг/л, Ca^{2+} – 4,53 мг/л, Mg^{2+} – 1,36 мг/л, SO_4^{2-} – 7,72 мг/л, HCO_3^- – 2,90 мг/л, и в 23 раза содержания P – 0,039 мг/л. Пробы, отобранные на постпирогенных BF3, BF5, BF6 и фоновом RG участках, сформировали второй кластер. Для второго кластера характерно сочетание двух условий – с одной стороны, средняя степень выгорания поверхности способствует восстановлению болота после пожара, в результате в водах постпирогенных участков отмечается отсутствие HCO_3^- при низких pH и наоборот рост средних концентраций NH_4^+ –

9,0 мг/л, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ – 2,18 мг/л, NO_3^- – 2,47 мг/л, ХПК – 197 мгО/л, а с другой стороны, сохраняется остаточное влияние пирогенного фактора на химический состав и в водах наблюдаются повышенные в 1,5–3 раза относительно фона концентрации K^+ – 0,9 мг/л, Ca^{2+} – 4,72 мг/л, Mg^{2+} – 1,42 мг/л, SO_4^{2-} – 7,27 мг/л, Pb – 0,00054 мг/л и в 19 раз выше фоновых отмечено содержание P – 0,032 мг/л. В третий кластер выделились пробы BF1 и BF2, в водах которых отмечается наиболее высокое содержание SO_4^{2-} (13,4 мг/л), HCO_3^- (3,51 мг/л), $\text{C}_{\text{орг}}$ (124 мг/л), P (0,081 мг/л), Mn (0,029 мг/л), повышенные величины pH, ХПК и минерализации вод.

Анализируя данные по Усть-Бакчарскому болоту, можно отметить, что пирогенные участки относительно фона характеризуются повышенным в 1,2–2,3 раза содержанием Ca^{2+} (5,49 мг/л), Mg^{2+} (1,36 мг/л), NH_4^+ (10,2 мг/л), $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (2,35 мг/л), NO_3^- (2,61 мг/л), $\text{C}_{\text{орг}}$ (115 мг/л), Cu (0,0046 мг/л), Cd (0,00006 мг/л), Pb (0,00085 мг/л). Кластерный анализ показал наличие двух кластеров. В первый кластер выделилась проба с фонового участка Усть-Бакчарского болота, а во второй кластер объединились пробы, отобранные с пирогенных участков. Статистический анализ с применением непараметрического критерия Уилкоксона не показал достоверных различий в химическом составе, что, вероятно, связано с тем, что в результате полевых исследований были отмечены следы более старого пожара (около 20 лет назад) на фоновом участке (UBфон). При этом повышение концентраций биогенных и органических веществ в болотных водах в большей степени свидетельствует о процессах деградации торфяной залежи в условиях низких уровней болотных вод, чем о влиянии пирогенного фактора, что согласуется со снижением пористости верхних слоев торфяной залежи, отмеченным при отборе проб (рис. 3).

Анализ данных по плоскобугристому болоту у с. Пангоды показал достоверные различия в химическом составе проб, отобранных на постпирогенных участках PF1 ($Z=2,68$, $p<0,007$) и PF2 ($Z=2,01$, $p<0,044$) по непараметрическому критерию Уилкоксона в сравнении с фоном PFфон. Однако кластерный анализ показал, что проба PF2 более близка по химическому составу к фоновой PFфон и объединил их в 1 кластер. В целом под влиянием пирогенного фактора отмечено существенное (в 2–11 раз) повышение относительно фона содержания в водах K^+ (0,9 мг/л), Ca^{2+} (14,0 мг/л), Mg^{2+} (7,58 мг/л), NH_4^+ (14,5 мг/л), $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (32,8 мг/л), NO_3^- (4,12 мг/л), ХПК (476 мгО/л), $\text{C}_{\text{орг}}$ (247 мг/л), P (0,315 мг/л), Mn (0,054 мг/л), Cu (0,0062 мг/л), Zn (0,010 мг/л), Cd (0,00017 мг/л), Pb (0,00079 мг/л). Следует отметить, что химический состав вод исследуемого постпирогенного участка плоскобугристого болота имеет существенные отличия в сравнении с опубликованными данными и более близкий состав имеет фоновый участок (PFфон) [33]. Так, в сравнении с опубликованными данными по плоскобугристым болотам в районе с. Пангоды в отобранных нами на постпирогенном участке пробах вод отмечены более высокие концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Na^+ , SO_4^{2-} , $\text{C}_{\text{орг}}$ и сопоставимое содержание K^+ , P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb.

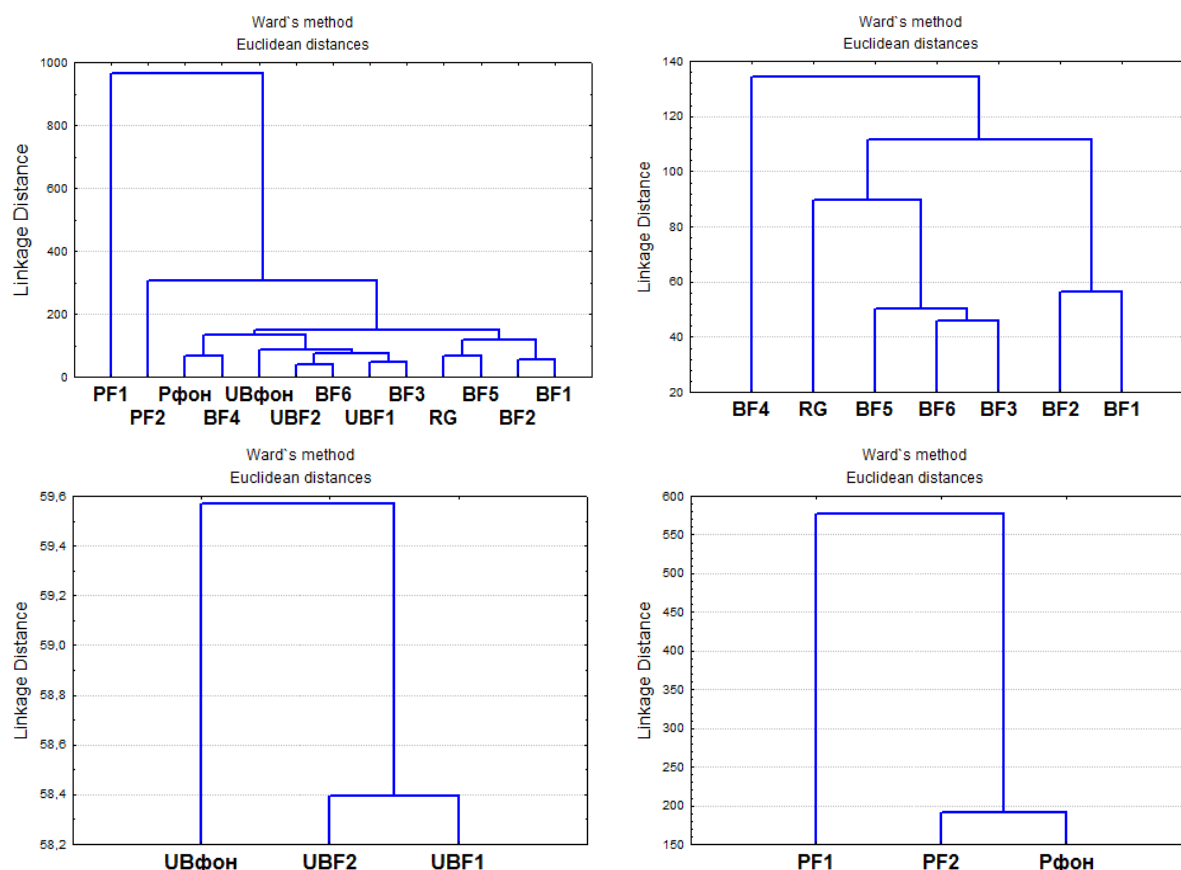


Рис. 3. Дендрогаммы химического состава вод участков Васюганского (BF1-6, RG), Усть-Бакчарского (UBF1-2, UBF фон) и плоскобугристого болот у с. Пангоды (PF1-2, Рфон)

Fig. 3. Dendrogram of the water chemical composition of the Great Vasyugan Mire (BF1-6, RG), Ust-Bakchar bog (UBF1-2, UBF фон) and palsa mire near Pangody village (PF1-2, Рфон)

Анализ условий формирования химического состава болотных вод с применением метода главных компонент показал, что в пределах Васюганского болота степень выгорания поверхности ($-0,78$) и температура воды ($-0,51$) определяет повышение pH вод ($-0,77$) и содержания Ca^{2+} ($-0,84$), SO_4^{2-} ($-0,78$), P ($-0,87$), HCO_3^- ($-0,77$), $\text{C}_{\text{орг}}$ ($-0,73$), CO_2 ($-0,71$), K^+ ($-0,54$), Mn ($-0,52$), при этом в обратной корреляции находятся Na^+ ($0,75$), $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ($0,89$), NO_3^- ($0,54$), Cu ($0,77$), Zn ($0,65$), Cd ($0,78$), Pb ($0,59$). Вторая компонента менее значима и характеризует процессы увеличения концентрации компонентов и их выноса при повышении уровней болотных вод ($0,76$). Высокие факторные нагрузки имеют NH_4^+ ($0,92$), NO_3^- ($0,64$ мг/л), SO_4^{2-} ($0,62$), $\text{C}_{\text{орг}}$ ($0,61$), Zn ($0,38$) и минерализация ($0,72$). В целом влияние температурного фактора на химический состав вод постпирогенных участков имеет интересную тенденцию. Исследования показывают, что выгоревшие участки Васюганского болота характеризуются более высокой температурой торфяной залежи и вод, при этом снижение температуры воды, величины pH и повышение содержания NH_4^+ , NO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ в водах на выгоревших участках коррелирует с восстановлением растительного покрова, которое стартовало согласно предыдущим исследованиям [26] на второй–третий год после пожара.

В пределах Усть-Бакчарского болота факторный анализ показал, что первая компонента наиболее значима (65%), а ведущим фактором формирования химического состава является степень выгорания поверхности ($-0,91$) и уровень болотных вод ($-0,84$). Высокие факторные нагрузки имеют ЕС ($-0,78$), Ca^{2+} ($-0,99$), Mg^{2+} ($-0,82$), NH_4^+ ($-0,99$), $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ($-0,91$), Cl ($-0,98$), NO_3^- ($-0,98$), ХПК ($-0,90$), $\text{C}_{\text{орг}}$ ($-0,94$), минерализация ($-0,99$), Cu ($-0,63$), Zn ($-0,63$), Pb ($-0,99$), что отражает процессы биodeградации торфяной залежи. В обратной корреляции находится температура воды ($0,95$), которая тесно связана с содержанием K^+ ($0,90$), HCO_3^- ($0,98$), Mn ($0,93$), O_2 ($0,90$). Вторая компонента в основном отражает влияние смены окислительно-восстановительных условий (Eh, $-0,81$) при колебании уровней болотных вод ($-0,55$) на pH вод ($-0,91$) и содержание SO_4^{2-} ($-0,89$), CO_2 ($-0,88$), P ($-0,94$), Cu ($-0,78$), Cd ($-0,99$), а также Zn ($0,78$), Na^+ ($0,99$), что характеризует закономерности их водной и биогенной миграции.

В пределах плоскобугристого болота у с. Пангоды первая компонента является наиболее значимой (75%), ведущими факторами формирования химического состава являются степень выгорания поверхности ($0,70$) и температура воды ($0,53$), которые находятся в прямой корреляции с pH ($0,84$), минерализацией ($0,98$) и содержанием большинства компонентов

в составе вод K^+ (0,99), Na^+ (0,98), Ca^{2+} (0,92), Mg^{2+} (0,99), NH_4^+ (0,88), $Fe_{общ}$ (0,99), Cl^- (0,99), NO_3^- (0,99), HCO_3^- (0,93), ХПК (0,98), CO_2 (0,99), $C_{орг}$ (0,99), Mn

(0,95), Cu (0,95), Cd (0,99), Pb (0,79), при этом в обратной корреляции находятся уровни болотных вод (-0,80), что характеризует эффект разбавления (рис. 4).

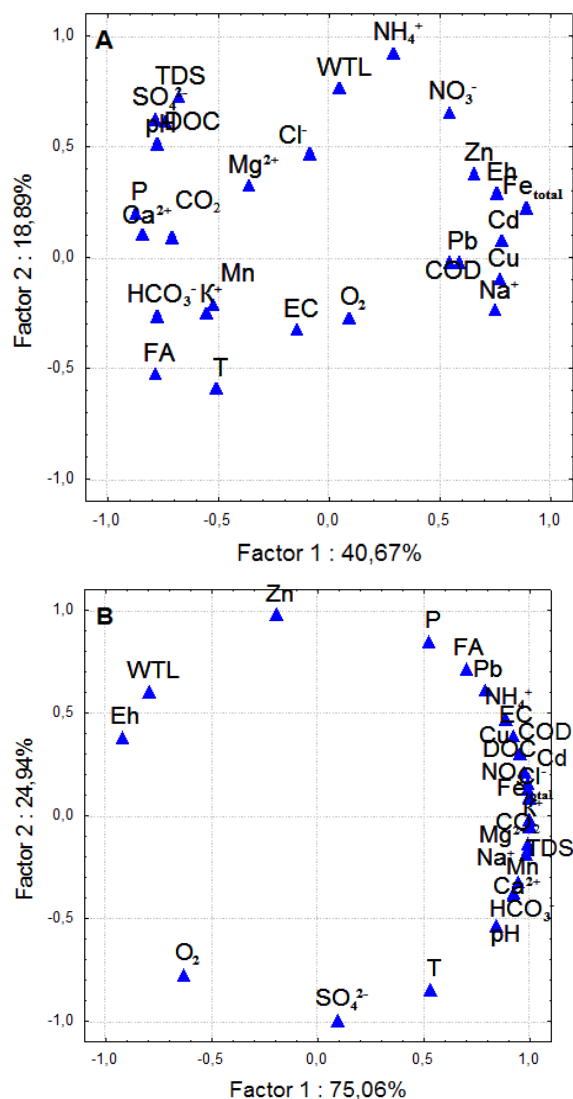


Рис. 4. Диаграммы факторного анализа химического состава вод участков Васюганского (А), Усть-Бакчарского (Б) и плоскобугристого болот (Б) у с. Пангоды (TDS – минерализация, мг/л; DOC – dissolved organic carbon) – растворенный углерод, мг/л; COD – химическое потребление кислорода, мгО/л; WTL – уровень болотных вод в дату отбора проб, см; T – температура воды в дату отбора проб, °C; EC – электропроводность, мкс/см; Eh – окислительно-восстановительный потенциал, мВ; FA – степень выгорания поверхности, %)

Fig. 4. Diagrams of factor analysis of water chemistry at Great Vasyugan mire (A), Ust-Bakchar bog (B), palsa mire near Pangody village (B) (TDS – total dissolved solids, mg/l; DOC – dissolved organic carbon, mg/l; COD – chemical oxygen demand, mgO/l; WTL – watel table level, cm; T – water temperature on the sampling date, °C; EC – electrical conductivity, μ S/cm; Eh – redox potential, mV; FA – degree of surface burnout, %)

Закключение

Исследования показали, что индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав болотных вод является повышение pH, минерализации и концентраций K^+ , SO_4^{2-} , а также Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , $Fe_{общ}$, NO_3^- , P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb. В процессе восстановления болота после пожара и минерализации растительных остатков в верхних выгоревших слоях торфяной залежи в водах отмечается постепенное повышение концентраций NH_4^+ , $C_{орг}$ и ХПК. Кластерный анализ, проведенный на основе всех отобранных проб болотных вод, показал существенные различия в химическом составе исследуемых объектов; по результатам анализа сформировано четыре кластера. Анализ данных по химическому составу исследуемых болот показал более высокие – в 4–16 раз – концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , NO_3^- , $Fe_{общ}$, HCO_3^- , $C_{орг}$ и

ХПК, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb в водах постпирогенных участков плоскобугристого болота в лесотундровой зоне в сравнении с пробами, отобранными на выгоревших участках верховых болот таежной зоны Западной Сибири. В пробах болотных вод, отобранных в таежной зоне в пределах постпирогенных участков Васюганского и Усть-Бакчарского болота, можно отметить сопоставимые средние концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , $C_{орг}$ и минерализации вод. Факторный анализ показал, что в таежной зоне Западной Сибири в пределах Васюганского и Усть-Бакчарского болота ведущим фактором формирования химического состава вод является степень выгорания поверхности, температура воды, уровни болотных вод, которые определяют повышение концентраций K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , $C_{орг}$, Mn, P, а также NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , $Fe_{общ}$, $C_{орг}$, Cl^- , Zn, Cu, Pb, что характери-

зуют процессы биodeградации и миграции веществ в торфяной залежи. В лесотундровой зоне ведущими факторами формирования химического состава вод является также степень выгорания поверхности и термический режим, однако факторный анализ показал, что повышение уровней болотных вод при оттаивании сезонной и многолетней мерзлоты и/или выпадении атмосферных осадков способствует снижению

концентрации исследуемых компонентов за счет эффекта разбавления.

Таким образом, химический состав вод постпирогенных болот во многом зависит от степени выгорания поверхности, исходных генетических особенностей болота и времени, прошедшего после пожара.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wildfires in the Siberian taiga / V.I. Kharuk, E.I. Ponomarev, G.A. Ivanova, M.L. Dvinskaya, S.C. Coogan, M.D. Flannigan // *Ambio*. – 2021. – V. 50. – P. 1953–1974. URL: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>, 2021 (дата обращения 15.01.2023).
2. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost / C. Ackley, S.E. Tank, K.M. Haynes, F. Rezanezhad, C. McCarter, W.L. Quinton // *Science of the Total Environment*. – 2021, 15 August. – V. 782. – 146841 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841
3. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia / A. Feurdean, G. Florescu, I. Tantau, B. Vanniere, A.-C. Diaconu, M. Pfeiffer, D. Warren, S.M. Hutchinson, N. Gorina, M. Galka, S. Kirpotin // *Quaternary Science Reviews*. – 2020. – № 244. – 106495. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495
4. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands / K. Nelson, D. Thompson, C. Hopkinson, R. Petrone, L. Chasmer // *Science of The Total Environment*. – 2021. – V. 769. – 145212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212
5. Carignan R., D'Arcy P., Lamontagne S. Comparative impacts of fire and forest harvesting on water quality in Boreal Shield lakes // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 2000. – V. 57. – P. 105–117. URL: <https://doi.org/10.1139/f00-125> (дата обращения 15.01.2023).
6. Ranalli A.J. A summary of the scientific literature on the effects of fire on the concentration of nutrients in surface waters. US Geological Survey Open-File Report 2004-1296. – P. 23. URL: <https://doi.org/10.3133/ofr20041296> (дата обращения 15.01.2023).
7. Othman M., Latif M.T. Dust and gas emissions from small-scale peat combustion // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2013. – V. 13 (3). – P. 1045–1059. DOI: 10.4209/aaqr.2012.08.0214
8. Post-fire water-quality response in the western United States / A.J. Rust, T.S. Hogue, S. Saxe, J. McCray // *International Journal of Wildland Fire*. – 2018. – V. 27 (3). – 203. DOI: 10.1071/wf17115
9. The effects of wildfire on the water chemistry of dilute, acidic lakes in southern Norway / E. Lydersen, R. Høgberget, C.E. Moreno et al. // *Biogeochemistry*. – 2014. – V. 119. – P. 109–124. URL: <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9951-8> (дата обращения 15.01.2023).
10. Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales / C.A. Emmerton, C.A. Cooke, S. Hustindss, U. Silins, M.B. Emelko, T. Lewis, J.F. Orwin // *Water Research*. – 2020. – 116071. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116071
11. Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Михайлова А.В. Изменение химического состава болотных вод после пожаров 2010 года (на примере водосбора Иваньковского водохранилища) // *Тр. Института*. – 2011. – № 4 (57). – С. 12–16.
12. Естественное восстановление болот после пожаров / Н.П. Ахметьева, С.Э. Белова, Р.Г. Джамалов, И.С. Куличевская, Е.Е. Лапина, А.В. Михайлова // *Водные ресурсы*. – 2014. – Т. 41. – № 4. – С. 343–354.
13. 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.
14. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Влияние катастрофических лесных пожаров на химический состав в бассейне р. Ануй (Северный Сихотэ-Алинь) // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. – 2016. – № 3. – С. 47–54.
15. Опыт оценки воздействия лесоторфяных пожаров на гидрохимические свойства эвтрофных болот / Т.Т. Ефремова, А.В. Пименов, С.П. Ефремов, А.Ф. Аврова, Д.Ю. Ефимов // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. – 2021. – № 5. – С. 537–546.
16. Украинцев А.В. Особенности миграции химических элементов в снежном покрове и поверхностных водах в районах лесных пожаров Центральной Бурятии: дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Улан-Удэ, 2017. – 141 с.
17. Wild fire impacts on surface water quality parameters: cause of data variability and reporting needs / O.D. Raolison, R. Valenca, A. Lee, S. Karim, J.P. Webster, B.A. Poulin, S.K. Mohanty // *Environmental Pollution*. – 2023, Jan 15. – V. 317. – 120713. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120713.
18. Assessing leached TOC, nutrients and phenols from peatland soils after lab-simulated wildfires: Implications to source water protection / Y. Wu, X. Xu, C.P.R. McCarter, N. Zhang, M.A. Ganzoury, J.M. Waddington, C-F. de Lannoy // *Science of The Total Environment*. – 20 May 2022. – V. 822. – 153579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153579> (дата обращения 15.01.2023).
19. Wild fire-driven changes in hydrology mobilize arsenic and metals from legacy mine waste / S.F. Murphy, R.B. McCleskey, D.A. Martin, J.M. Holloway, J.H. Writer // *Science of The Total Environment*. – 2020. – 140635. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140635
20. Post-fire composition of lipids in waters and plants of Great Vasyugan Mire / I.V. Russkikh, E.B. Strelnikova, O.V. Serebrennikova, Yu.A. Kharanzhevskaya // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 928. – 2021. – 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012010
21. Smouldering fire in a nutrient-limited wetland ecosystem: long-lasting changes in water and soil chemistry facilitate shrub expansion into a drained burned fen / M. Sulwiński, M. Mętrak, M. Wilk, M. Suska-Malawska // *Science of The Total Environment*. – 2020. – V. 746. – 141142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142
22. Савичев О.Г., Мазуров А.К. Временные изменения химического состава вод в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 38–48.
23. Сравнительный анализ подземных и болотных вод в юго-восточной части Западной Сибири / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Хэн Ян, Е.В. Перегудина // *Разведка и охрана вод*. – 2022. – № 5. – С. 26–33. DOI: 10.53085/0034-026X_2022_05_26
24. Фоновые показатели эколого-геохимического состояния вод верховых болот в таежной зоне на территории Российской Федерации / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, М.А. Рудмин, А.А. Хвашевская, А.Б. Даулетова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 101–116.
25. Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья рек Икса-Шегарка) / В.А. Базанов, Б.А. Егоров, В.А. Лыготин, А.А. Скугарев // *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития* / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. – С. 190–196.
26. Post-fire ecological consequences within the drained site of the Great Vasyugan Mire: retrospective water-thermal regime and pyrogenic disturbance estimation / A.A. Sinyutkina, L.P. Gashkova, N.G. Koronotova, A.A. Maloletko, N.P. Mironycheva-Tokareva, I.V. Russkikh, O.V. Serebrennikova,

- E.B. Strelnikova, E.K. Vishnyakova, Yu.A. Kharanzhevskaya // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2020. – V. 408. – 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
27. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464> (дата обращения 15.01.2023).
28. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. – М.: Форум, 2011. – 464 с.
29. 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. – V. 928. – 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006
30. Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Интегральная оценка пирогенной нагрузки по содержанию Cu, Pb, Zn и Cd в компонентах Васюганского болота (Западная Сибирь) // Геосферные исследования. – 2019. – № 4. – С. 62–73.
31. Гашкова Л.П. Оценка влияния выгорания растительности на распределение элементов в торфяной залежи верхового болота // Геосферные исследования. – 2022. – № 1. – С. 118–125. DOI: 10.17223/25421379/22/9
32. Post fire litters are richer in water soluble carbon and lead to increased microbial activity / E. Stirling, L.M. Macdonald, R.J. Smernik, T.R. Cavagnaro // Applied Soil Ecology. – 2019. – V. 136. – P. 101–105. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.12.021
33. Раудина Т.В. Состав и свойства жидкой фазы торфяных почв криолитозоны Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Томск, 2018. – 24 с.

Поступила: 19.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 14.02.2023 г.

Информация об авторах

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

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

UDC 556.561

WILDFIRE-RELATED CHANGES OF MIRE WATER CHEMISTRY IN FOREST-TUNDRA AND TAIGA ZONES OF WESTERN SIBERIA

Yulia A. Kharanzhevskaya¹,
kharan@yandex.ru

Anna A. Sinyutkina¹,
ankalaeva@yandex.ru

¹ Siberian Research Institute of Agriculture and Peat branch of Siberian Federal Scientific Centre
of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences,
3, Gagarin street, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to assess changes in waters chemical composition of mires under the influence of the pyrogenic factor.

The aim: to study mire water chemistry of post-fire areas in the forest-tundra and taiga zones of Western Siberia, to analyze the conditions for its formation and patterns of spatial variation depending on the degree of surface burnout.

Objects: Great Vasyugan Mire, Ust-Bakchar bog, palsa mire near Pangody village.

Methods. Laboratory analysis of the water chemical composition was carried out by titrimetry, spectrophotometry, and flame photometry at the Laboratory and Analytical Center of the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat. Analysis of Cu, Pb, Cd, Zn, P, Mn content in water samples was carried out by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the Plasma Chemical Analytical Center. Statistical data processing was carried out using the nonparametric Wilcoxon test, cluster analysis, and principal component analysis.

Results. Studies have shown that an indicator of the influence of the pyrogenic factor on the water chemistry is an increase in pH, total dissolved solids and concentrations of K^+ , SO_4^{2-} , as well as Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , NO_3^- , Fe_{total} , P, Mn, Zn, Cd, Cu, Pb. During the self-restoration of mires after the fire, a gradual increase in the concentrations of NH_4^+ , DOC and COD is noted in the waters. Analysis of the data showed 4–16 times higher concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , NO_3^- , Fe_{total} , HCO_3^- , DOC and COD, P, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb in the waters of palsa mire in the forest-tundra zone in comparison with water samples taken in the burnt areas in the taiga zone of Western Siberia. Factor analysis showed that the leading factor in the formation of water chemistry is the degree of surface burnout, water temperature, and water table levels. Thus, studies have shown that the water chemistry of post-fire mires largely depends on the degree of surface burnout, the initial genetic characteristics of the mire, and the time elapsed after the fire.

Key words:

Waters, chemical composition, pyrogenic factor, influence, Western Siberia.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-77-10024.

REFERENCES

1. 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, 50, pp. 1953–1974. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>, 2021 (accessed 15 January 2023).
2. 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, 15 August, vol. 782, 146841. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841
3. 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
4. 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, vol. 769, 145212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145212
5. Carignan R., D'Arcy P., Lamontagne S. Comparative impacts of fire and forest harvesting on water quality in Boreal Shield lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, vol. 57, pp. 105–117. Available at: <https://doi.org/10.1139/f00-125> (accessed 15 January 2023).
6. Ranalli A.J. A summary of the scientific literature on the effects of fire on the concentration of nutrients in surface waters. *US Geological Survey Open-File Report 2004-1296*, 23 p. Available at: <https://doi.org/10.3133/ofr20041296> (accessed 15 January 2023).
7. Othman M., Latif M.T. Dust and gas emissions from small-scale peat combustion. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, vol. 13 (3), pp. 1045–1059. DOI: 10.4209/aaqr.2012.08.0214
8. 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, vol. 27 (3), 203. DOI: 10.1071/wf17115
9. Lydersen E., Høgberget R., Moreno C.E. The effects of wild fire on the water chemistry of dilute, acidic lakes in southern Norway. *Biogeochemistry*, 2014, vol. 119, pp. 109–124. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9951-8> (accessed 15 January 2023).
10. Emmerton C.A., Cooke C.A., Hustindss S., Silins U., Emelko M.B., Lewis T., Orwin J.F. Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Research*, 2020, 116071. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116071
11. 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 Rus.
12. Akhmeteva N.P., Belova S.E., Dzhamalov R.G., Kulichevskaya I.S., Lapina E.E., Mikhailova A.V. Self-restoration of mires after fires. *Water resources*, 2014, vol. 41, no. 4, pp. 343–354. In Rus.
13. Akhmeteva N.P., Mikhaylova A.V., Krichevsk G.N., Belyayev A.Yu. *Torfyanye bolota tsentralnogo okhvata chastei 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 Publ., 2020. 134 p.
14. Shesterkin V.P., Shesterkina N.M. Influence of catastrophic forest fires on the chemical composition in the basin of the Anyui River (Northern Sikhote-Alin). *Bulletin of the North-Eastern Scientific*

- Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, no. 3, pp. 47–54.
15. 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 Rus.
 16. Ukreintsev A.V. *Osobennosti migratsii khimicheskikh elementov v snezhnom pokrove i poverkhnostnykh vodakh v rayonakh lesnykh pozharishch Tsentralnoy Buryatii*. Dis. Kand. nauk [Features of the migration of chemical elements in the snow cover and surface waters in the areas of forest fires in Central Buryatia, Cand. Diss.]. Ulan-Ude, 2017. 141 p.
 17. Raelison O.D., Valenca R., Lee A., Karim S., Webster J.P., Poulin B.A., Mohanty S.K. Wildfire impacts on surface water quality parameters: Cause of data variability and reporting needs. *Environmental Pollution*, 2023, Jan 15, vol. 317, 120713. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120713.
 18. Wu Y., Xu X., McCarter C.P.R., Zhang N., Ganzoury M.A., Waddington J.M., De Lannoy C-F. Assessing leached TOC, nutrients and phenols from peatland soils after lab-simulated wildfires: Implications to source water protection. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 822, 153579. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153579> (accessed 15 January 2023).
 19. Murphy S.F., McCleskey R.B., Martin D.A., Holloway J.M., Writer J.H. Wildfire-driven changes in hydrology mobilize arsenic and metals from legacy mine waste. *Science of The Total Environment*, 2020, 140635. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140635
 20. Russkikh I.V., Strelnikova 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, vol. 928, 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012010
 21. Sulwiński M., Metrak 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, vol. 746, 141142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142
 22. Savichev O.G., Mazurov A.K. Temporal changes in the chemical composition of waters in the eastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 38–48. In Rus.
 23. Savichev O.G., Domarenko V.A., Yang Heng, Peregudina E.V. Comparative analysis of underground and swamp waters in the southeastern part of Western Siberia. *Exploration and protection of waters*, 2022, no. 5, pp. 26–33. In Rus. DOI: 10.53085/0034-026X_2022_05_26
 24. Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Khvashchevskaya A.A., Dauletova A.B. Background indicators of the ecological and geochemical state of the waters of raised bogs in the taiga zone on the territory of the Russian Federation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 101–116. In Rus.
 25. Bazanov V.A., Egorov B.A., Lgotin V.A., Skugarev A.A. Sovremennaya prostranstvennaya dinamika Bolshogo Vasyuganskogo bolota (na primere mezhdurechya rek Iksa–Shegarka) [Modern spatial dynamics of the Great Vasyugan Mire (on the example of the interfluvium of the Iksa–Shegarka rivers)]. *Bolshoe Vasyuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Great Vasyugan Mire. Current state and development processes]. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ. house, 2002. pp. 190–196.
 26. Sinyutkina A.A., Gashkova L.P., Koronotova N.G., Maloletko A.A., Mironycheva-Tokareva N.P., Russkikh I.V., Serebrennikova O.V., Strelnikova 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. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 408, 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
 27. 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464> (accessed 15 January 2023).
 28. Vukolov E.A. *Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsiy s ispolzovaniem paketov STATISTICA i EXCEL* [Basics of statistical analysis. Manual on statistical methods and operations research using STATISTICA and EXCEL Packages]. Moscow, Forum Publ., 2011. 464 p.
 29. 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, vol. 928, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006
 30. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Integral assessment of the pyrogenic load by the content of Cu, Pb, Zn and Cd in the components of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *Geosphere Research*, 2019, no. 4, pp. 62–73. In Rus.
 31. Gashkova L.P. Evaluation of the effect of vegetation burnout on the distribution of elements in the peat deposit of a raised bog. *Geosphere Research*, 2022, no. 1, pp. 118–125. In Rus. DOI: 10.17223/25421379/22/9
 32. Stirling E., Macdonald L.M., Smernik R.J., Cavagnaro T.R. Post fire litter is richer in water soluble carbon and lead to increased microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 2019, no. 136, pp. 101–105. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.12.021
 33. Raudina T.V. *Sostav i svoystva zhidkoy fazy torfyanykh pochv kriolitozony Zapadnoy Sibiri*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Composition and properties of the liquid phase of peat soils in the permafrost zone of Western Siberia. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2018. 24 p.

Received: 19 January 2023.
Reviewed: 14 February 2023.

Information about the authors

Yulia A. Kharanzhevskaya, Cand. Sc., senior researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences.

Anna A. Sinyutkina, Cand. Sc., senior researcher, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat branch of Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences.