

УДК 556.561

АНАЛИЗ СЕЗОННОЙ И МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД ОСУШЕННОГО УЧАСТКА ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА

Харанжевская Юлия Александровна,
kharan@yandex.ru

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 трансформации химического состава природных вод под влиянием изменения климата и хозяйственной деятельности.

Цель: исследование химического состава вод Васюганского болота, анализ условий его формирования, оценка сезонных и многолетних закономерностей его изменения под влиянием осушения.

Объекты: северо-восточный участок Васюганского болота в районе с. Полынянка Бакчарского района Томской области.

Методы. Лабораторное изучение 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. Статистический анализ данных проводился с применением непараметрического критерия Манна–Уитни, кластерного анализа и метода главных компонент.

Результаты. Исследования показали, что в результате проведенной лесомелиорации, а также вследствие пожара 2016 г. в водах северо-восточного участка Васюганского болота, в сравнении с естественной его частью, отмечается статистически значимое повышение концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. Однако в настоящее время в связи с зарастанием каналов отмечается процесс самовосстановления болота, в результате чего химический состав вод осушенного и естественного участков Васюганского болота имеет минимальные отличия в маловодные 2015–2016 гг. и многоводный 2018 г. и более существенные различия в содержании компонентов наблюдаются в средние 2017, 2020–2021 гг. и маловодный 2019 г. Индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав являлось повышение в болотных водах величины pH и содержания ионов K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , а также Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$. Анализ условий формирования химического состава вод Васюганского болота показал, что ведущим фактором является температура, при этом повышение уровней болотных вод после продолжительных засушливых периодов приводит к повышению концентраций химических веществ в водах.

Ключевые слова:

Болотные воды, химический состав, лесомелиорация, влияние, Васюганское болото, Западная Сибирь.

Введение

В настоящее время проблема деградации болот в результате хозяйственного использования и в условиях изменения климата является одной из самых актуальных в мире [1–7]. Важность проблем определяется экологическими функциями, которые выполняют болотные экосистемы. Болота в естественном состоянии поглощают углекислый газ и выделяют кислород, играя тем самым ключевую роль в балансе углерода [7, 8]. Болота способны ассимилировать большое количество загрязняющих веществ из атмосферы, а располагаясь в поймах и террасах рек выполняют функцию геохимических барьеров, отвечающих за сохранение качества речных вод [9–11]. Гидрологическая роль определяется наличием аккумулятивной емкости в деятельном слое торфяной залежи и осциллирующей поверхности болот [12, 13], что способствует снижению паводочного стока рек. Осушение болот и их хозяйственное использование ведет к деградации экосистем, меняется растительный покров, увеличивается вынос минеральных и органических веществ [14–16], изменяются водно-физические свойства торфяной залежи [17].

В последние десятилетия в бореальных водоемах и водотоках по всему миру наблюдаются повышенные концентрации углерода и цветности вод, что связывают, с одной стороны, с изменением климата и

уменьшением кислотных выпадений [18], а с другой стороны – с масштабным осушением болот [16]. Так, крупномасштабное осушение болот в Северной Европе для лесного хозяйства в результате оказало значительное влияние на качество речных вод в бассейне Балтийского моря [16]. Для юга Западной Сибири, где хозяйственное использование болот невелико, осушенные участки болот могут являться своеобразными природными моделями для оценки влияния изменений климата на качество природных вод. В условиях высокой заболоченности водосборов рек Западной Сибири вопрос изучения химического состава болотных вод весьма актуален в связи ведущей ролью болот в формировании состава речных вод данной территории, которая является водосборным бассейном Карского моря. Целью данной работы является исследование химического состава вод Васюганского болота, анализ условий его формирования, оценка сезонных и многолетних закономерностей его изменения под влиянием осушения.

Объекты и методика исследования

Исследования проводились в пределах северо-восточного участка Васюганского болота в границах бассейна р. Гавриловка (левобережный приток р. Икса), вблизи с. Полынянка Бакчарского района Томской области. В 1980-х гг. проведена лесомелиорация,

осушение выполнено сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м. В настоящее время отмечается зарастание осушительных каналов и восстановление скорости торфонакопления (рис. 1) [19, 20]. В 2016 г. на расстоянии 200 м на юг от участка отбора проб произошел пожар и выгорела территория площадью 5,54 км². Наибольшее выгорание растительности и поверхности болота 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 [21]. В качестве фоновой территории был использован аналогичный естественный участок Васюганского болота, расположенный в 8 км севернее, в границах водосбора малой р. Ключ (правобережный приток р. Бакчар).

Отбор проб болотных вод производился с периодичностью 1 раз в месяц с марта по сентябрь 2015–2021 гг. в пределах аналогичных сосново-кустарничково-сфагновых болотных микроландшафтов, мощность торфяной залежи на осушенном участке (56°53' 25,8", 82°40' 50,5") составила 2,75 м, на естественном участке (56°58'24, 3", 82°36'41,2") – 2,90 м. Всего было отобрано 42 пробы на осушенном участке (ПГ) и 49 проб болотных вод на естественном участке (ПЗ) Васюганского болота. Определение химического состава болотных вод (табл. 1) проводилось в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН. Оценка условий формирования химического состава болотных вод и особенностей гидрохимического режима болота проводилась с применением данных наблюдений за температурой воздуха и количеством атмосферных осадков по метеостанции у с. Бакчар, а также использовались данные, полученные с применением автономных сенсорных датчиков уровней и температуры (САМ, ИМКЭС СО РАН), установленных в торфяную залежь непосредственно в месте отбора проб [22].

Методика исследований включала кластерный анализ и оценку значимости различий в химическом составе вод естественного и осушенного участков Васюганского болота по непараметрическому критерию Манна–Уитни при уровне значимости $p=5\%$ в Statistica 10:

$$Z = \frac{W - \frac{1}{2}n_x n_y}{\sqrt{\frac{1}{12}n_x n_y (n_x + n_y + 1)}}$$

где W – статистика критерия, определяется согласно выражению

$$W = n_x n_y + \frac{n(n+1)}{2} - R,$$

где n_x , n_y – объем выборки x и y , n – объем выборки, имеющей большую ранговую сумму, R – большая сумма рангов (порядковых номеров) выборок x и y [23].

Кластерный анализ проводили с использованием иерархического метода Уорда с расчетом евклидова расстояния. Статистический анализ условий форми-

рования химического состава болотных вод осушенного участка Васюганского болота осуществлялся методом главных компонент (Principal component analysis) с расчетом факторных нагрузок и построением графика каменистой осыпи.

Таблица 1. Описание методов определения химического состава болотных вод

Table 1. Analytical methods

Компонент Component	Метод/Method
Ca ²⁺	Титриметрия/Titrimetry
Mg ²⁺	Титриметрия/Titrimetry
K ⁺	Пламенная фотометрия/Flame photometry (PFA-378, Russia)
Na ⁺	Пламенная фотометрия/Flame photometry (PFA-378, Russia)
SO ₄ ²⁻	Спектрофотометрия/Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
Cl ⁻	Титриметрия/Titrimetry
NH ₄ ⁺	Спектрофотометрия/Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
Fe _{total}	Спектрофотометрия/Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
HCO ₃ ⁻	Титриметрия/Titrimetry
NO ₃ ⁻	Спектрофотометрия/Spectrophotometry (Specol-1300, Analytik Jena, Germany)
C _{орг} /DOC	Спектрофотометрия Spectrophotometry (PE-5400VI, Russia)
XПК/COD	Титриметрия/Titrimetry

Результаты и обсуждение

Исследования химического состава болотных вод осушенного и естественного участка Васюганского болота проводились за период наблюдений 2015–2021 гг. За период исследований можно выделить маловодные года – 2015, 2016, 2019, средние по водности – 2017, 2020, 2021 и многоводный 2018 г. (табл. 1). Среднегодовая температура за период исследований составила 1,12 °С. За 7 лет наиболее теплообеспеченными являлись 2015–2016 и 2020–2021 гг., среднегодовая температура воздуха в 2015 и 2020 гг. составила 2,05–3,03 °С, что являлось абсолютным максимумом за период наблюдений 1970–2021 гг. на метеостанции у с. Бакчар. Анализ уровня режима показал, что осушенный и естественный участки Васюганского болота характеризуются достоверными различиями в отметках уровней болотных вод (УБВ) за апрель–сентябрь 2015–2021, в многолетней динамике снижение среднесезонных уровней на осушенном участке отмечалось в 2016–2017, 2019–2021 гг., тогда как на естественном участке более низкие уровни воды были отмечены в 2015, 2016, 2019 гг. (табл. 2).

Анализируя весь массив данных за многолетний период, можно отметить, что осушенный участок характеризуется повышенным содержанием всех компонентов в химическом составе вод в сравнении с естественным участком, при этом наиболее достоверные различия (тест Манна–Уитни) отмечаются по Ca²⁺ ($Z=1,69$, $p<0,05$), Mg²⁺ ($Z=1,55$, $p<0,05$), Fe_{общ} ($Z=1,20$, $p<0,05$), NH₄⁺ ($Z=1,24$, $p<0,05$), NO₃⁻ ($Z=1,34$, $p<0,05$), Cl⁻ ($Z=1,23$, $p<0,05$), C_{орг} ($Z=1,25$, $p<0,05$), ЕС ($Z=1,24$, $p<0,05$), что согласуется с опубликованными данными [14, 24]. Исследования, проведенные в Фин-

ляндии [14], показали, что в водах осушенного болота аналогично нашим данным отмечаются более высокие концентрации Ca^{2+} , $\text{C}_{\text{орг}}$. Увеличение концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ в водах связано с его повышенной продукцией в водах в условиях увеличения флуктуации уровней болотных вод. Повышение концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в водах в результате осушения определяется формированием аэробных условий в торфяной залежи, сниже-

нием pH при увеличении концентрации гуминовых веществ, что отмечается также в [24]. Исследования на болотах Шотландии показали, что отмечается увеличение сезонной вариации химического состава вод под влиянием осушения на 35–80 % от общей дисперсии [24]. Однако наши данные показали более существенную вариацию в химическом составе естественного участка Васюганского болота.

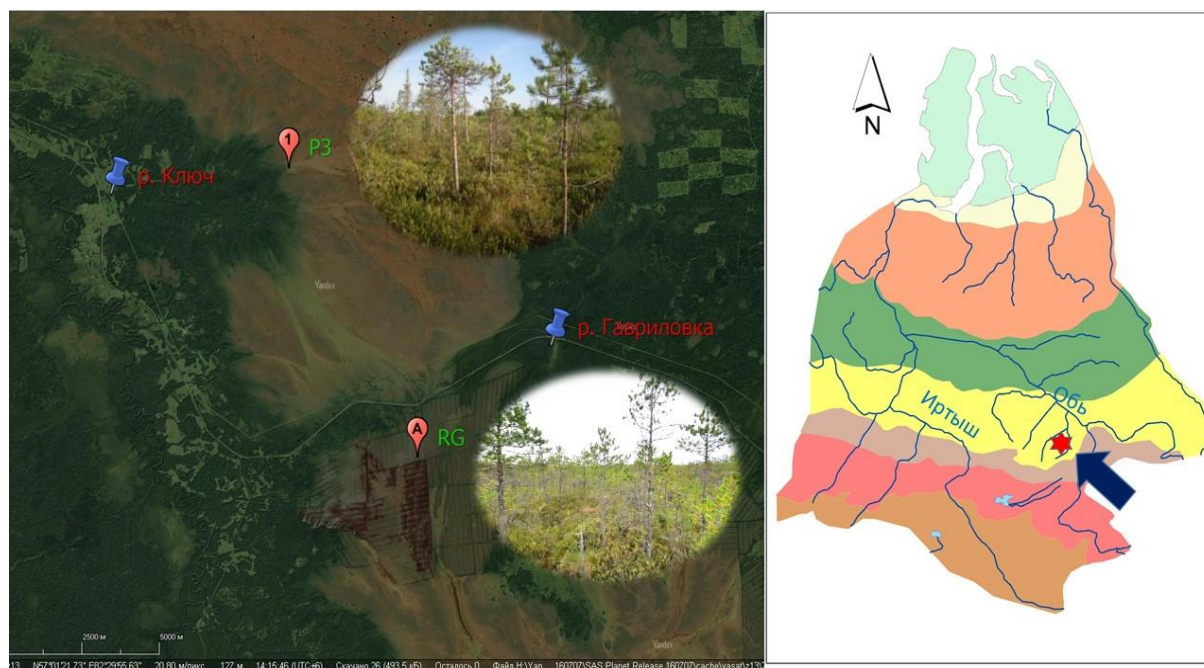


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб в пределах Васюганского болота

Fig. 1. Sampling points location within the Great Vasyugan mire

Таблица 2. Гидрометеорологические условия согласно данным метеорологической станции у с. Бакчар [25]

Table 2. Hydrometeorological conditions according to the meteorological station near the Bakchar village [25]

Год Year	Сумма осадков, мм Amount of precipitation, mm		Среднегодовая температура воздуха, °C Average annual air temperature, °C	Сумма $T > 10^\circ\text{C}$ Sum $T > 10^\circ\text{C}$	УБВ апрель–сентябрь, см WTL April– September, cm
	за год per year	за апрель–сентябрь in April–September			осушенный/ естественный drained/pristine
2015	616	382	2,05	1972	–22/–20
2016	486	348	0,72	2162	–24/–20
2017	566	419	1,30	1891	–25/–14
2018	677	495	–0,80	1781	–22/–13
2019	431	284	0,88	1860	–25/–19
2020	477	293	3,03	2136	–30/–17
2021	630	470	0,63	2001	–25/–12

Сопоставление химического состава вод осушенного и естественного участков Васюганского болота показало, что в разные годы достоверные различия

отмечаются по разным компонентам (рис. 2). Так, в маловодный 2015 г. отмечены статистически значимые различия по содержанию в водах осушенного участка Cl^- ($Z=2,19$, $p=0,028$), NO_3^- ($Z=2,65$, $p=0,008$). В 2016 г., который также можно охарактеризовать как маловодный, достоверные различия в составе вод осушенного участка определяется только повышенными концентрациями CO_2 ($Z=2,16$, $p=0,031$).

В средний по водности 2017 г. отмечаются более значимые различия по содержанию в водах осушенного участка Ca^{2+} ($Z=2,00$, $p=0,045$), $\text{C}_{\text{орг}}$ ($Z=2,32$, $p=0,020$), а также по величине УБВ ($Z=-2,24$, $p=0,025$). В многоводный 2018 г. отмечались различия в концентрации в водах Cl^- ($Z=2,48$, $p=0,013$), $\text{C}_{\text{орг}}$ ($Z=2,00$, $p=0,045$), а также минерализации вод ($Z=2,16$, $p=0,031$), что определяется засушливыми условиями в конце вегетационного периода 2017 г. В маловодный 2019 г. и как следствие пожара в водах осушенного участка достоверно повышается содержание Ca^{2+} ($Z=2,00$, $p=0,045$), SO_4^{2-} ($Z=2,00$, $p=0,045$), $\text{C}_{\text{орг}}$ ($Z=2,48$, $p=0,013$) и общая минерализация вод ($Z=2,16$, $p=0,030$). В средний по водности 2020 г. наблюдалось достоверно более высокое содержание в водах осушенного участка Ca^{2+} ($Z=2,00$, $p=0,045$), ХПК ($Z=2,00$, $p=0,045$), CO_2 ($Z=2,32$, $p=0,020$). В 2021 г., который также можно охарактеризовать как средний по водности, отмечены достоверные различия по содержанию

в водах Ca^{2+} ($Z=2,16$, $p=0,031$), Mg^{2+} ($Z=2,32$, $p=0,020$), ХПК ($Z=2,16$, $p=0,031$), $\text{C}_{\text{орг}}$ ($Z=2,16$, $p=0,031$). В целом можно отметить тенденцию увеличения различий в химическом составе естественного и осушенного участков Васюганского болота начиная с 2017 г., что является следствием пожара 2016 г., произошедшего на сопредельной территории болота.

Анализ многолетних изменений химического состава вод показал сходную динамику содержания Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ и минерализации вод на осушенном и естественном участках Васюганского болота, максимальные концентрации которых отмечены в маловодный 2015 г. Содержание остальных компо-

нентов в водах естественного и осушенного участка болота имеет более сложную динамику, в том числе в связи с влиянием пожара, в результате чего отмечено увеличение в водах pH, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, в 2016, 2017, 2019 гг., и наблюдается рост содержания Cl^- , NO_3^- в 2019–2021 гг. Минимальные концентрации всех исследуемых компонентов в водах естественного участка отмечены в многоводный 2018 г. и маловодный 2019 г. В водах осушенного участка минимальные pH и концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- отмечены в многоводный 2018 г., Na^+ , K^+ , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, HCO_3^- , минерализации в 2021 г., NO_3^- и $\text{C}_{\text{орг}}$ в 2016 г.

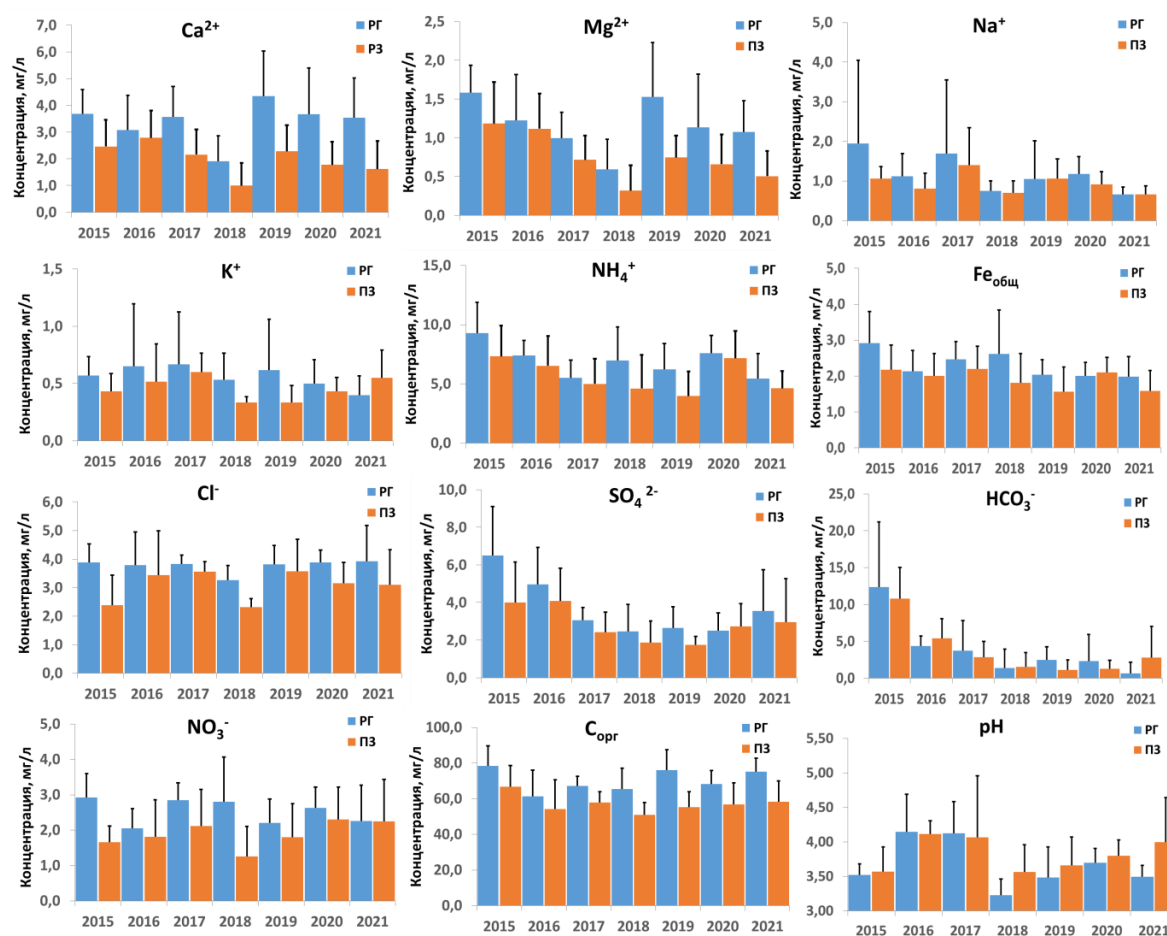


Рис. 2. Многолетняя динамика химического состава вод осушенного (РГ) и естественного (ПЗ) участков Васюганского болота в 2015–2021 гг. (планками обозначено стандартное отклонение)

Fig. 2. Long-term dynamics in water chemistry at drained (RG) and pristine (P3) parts of the Great Vasyugan mire in 2015–2021 (bars indicate standard deviation)

Отмеченные закономерности изменения химического состава вод осушенного участка Васюганского болота в результате влияния пожара в целом согласуются с опубликованными данными [26–28] и проведенными нами исследованиями в пределах выгоревшего участка [29]. Анализ химического состава болотных вод, отобранных на мезотрофном болоте Галицкий мох в Тверской области, выгоревшем на глубину до 30 см в 2010 г., показал, что общая минерализация воды возросла в 3 раза, увеличился pH вод

до 7,2, повысилось содержание Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , HCO_3^- , снизилась цветность вод [26, 27]. Результаты, полученные на участке низинного болота в Бейжанском национальном парке в Польше, показали, что в водах спустя 12 лет после пожара отмечаются более высокий pH, повышенные концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , а на некоторых участках также PO_4^{3-} и Fe^{3+} [28]. Под влиянием пирогенного фактора в водах Васюганского болота отмечается увеличение концентраций K^+ , Na^+ , Ca^{2+} ,

Mg^{2+} , $Fe_{общ}$, SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- [29]. Также влияние пожара на химический состав отмечается и за пределами пожарного контура, что связано с выносом веществ с болотными водами при фильтрации их в торфяной залежи и в результате аэрозольного переноса веществ [30]. Поэтому пожар 2016 г. оказал влияние на химический состав болотных вод как осушенного участка, так и естественного участка Васюганского болота, который расположен в 8 км.

Анализируя сезонную динамику за период 2015–2021 гг., можно отметить, что достоверные различия по критерию Манна–Уитни в химическом составе вод осушенного и естественного участка Васюганского болота отмечаются в апреле по содержанию в болотных водах NO_3^- ($Z=2,93$, $p=0,003$), Cl^- ($Z=2,50$, $p=0,012$), HCO_3^- ($Z=-2,50$, $p=0,012$), ХПК ($Z=-2,01$, $p=0,038$) и в мае по концентрациям Ca^{2+} ($Z=2,30$, $p=0,021$), $Fe_{общ}$ ($Z=2,62$, $p=0,009$), Cl^- ($Z=2,17$, $p=0,030$), NO_3^- ($Z=2,17$, $p=0,030$), $C_{орг}$ ($Z=2,30$, $p=0,021$), CO_2 ($Z=2,30$, $p=0,021$). В мае также отмечаются достоверные различия в отметках уровня болотных вод ($Z=-2,62$, $p=0,009$). В летний период достоверные различия отмечены по содержанию в июне в водах NH_4^+ ($Z=-2,17$, $p=0,030$), $C_{орг}$ ($Z=2,43$, $p=0,015$), CO_2 ($Z=2,04$, $p=0,041$), что также согласуется с различиями в уровнях болотных вод в этот период ($Z=-2,36$, $p=0,018$). В июле значимые различия в химическом составе осушенного и естественного участков наблюдаются только по содержанию $C_{орг}$ ($Z=2,55$, $p=0,011$) (табл. 3). В августе повышаются различия в концентрациях в болотных водах Ca^{2+} ($Z=2,17$, $p=0,030$), $C_{орг}$ ($Z=2,56$, $p=0,011$), что согласуется с достоверными различиями в уровнях болотных вод ($Z=-2,43$, $p=0,018$). В сентябре отмечаются достоверные различия в содержании в болотных водах Ca^{2+} ($Z=2,04$, $p=0,041$), $C_{орг}$ ($Z=2,43$, $p=0,015$), CO_2 ($Z=2,04$, $p=0,041$).

Анализ сезонной динамики химического состава болотных вод естественного и осушенного участков Васюганского болота показал повышение концентраций компонентов химического состава болотных вод в конце зимы и в летний межennyй период, что согласуется с ранними исследованиями [31, 32]. В марте в связи с концентрированием раствора при промерзании торфяной залежи возрастает pH, минерализация вод и содержание Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , а также в водах идет процесс трансформации растительных остатков, о чем свидетельствует резкое возрастание концентраций CO_2 , $C_{орг}$ и величин ХПК в водах. Повышение концентрации K^+ в марте отмечено преимущественно в пределах осушенного участка, что, вероятно, является следствием пожара. Повышение концентрации компонентов химического состава болотных вод в летний период определяется процессами трансформации органических остатков верхних слоев торфяной залежи при повышении температуры воздуха и/или снижении уровней болотных вод с июля по сентябрь: отмечается увеличение ЕС, pH, минерализации вод, величин ХПК, концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} и биогенных компонентов состава болотных вод NH_4^+ , NO_3^- , $Fe_{общ}$,

а также CO_2 и $C_{орг}$. Следует отметить, что особенности сезонной динамики химического состава вод Васюганского болота сопоставимы с данными, полученными по основным типам болот России [33, 34]. Сравнение с результатами, полученными на смежном участке Васюганского болота [35], показало сопоставимое содержание компонентов в химическом составе болотных вод, однако несколько различные тенденции в гидрохимическом режиме, что, вероятно, связано с неравномерностью отбора проб по сезонам.

Таблица 3. Сезонная динамика химического состава вод на естественном и осушенном участке Васюганского болота в 2015–2021 гг.

Table 3. Seasonal dynamics in water chemistry at the pristine and drained area of the Great Vasyugan mire in 2015–2021

Компонент Component	Участок Site	Зима Winter	Весна Spring		Лето Summer			Осень Autumn
		III*	IV	V	VI	VII	VIII	IX
pH	РГ	3,97	3,95	3,52	3,52	3,80	3,74	3,53
	ПЗ	3,84	4,13	3,89	3,57	3,62	3,91	3,83
K^+	РГ	1,48	0,50	0,40	0,47	0,47	0,55	0,97
	ПЗ	0,40	0,41	0,34	0,44	0,49	0,51	0,52
Na^+	РГ	2,10	1,05	0,71	0,74	0,96	1,26	2,36
	ПЗ	2,33	0,88	0,77	0,73	0,94	1,17	1,21
Ca^{2+}	РГ	5,17	2,38	3,47	3,59	2,53	3,90	4,33
	ПЗ	3,99	1,48	1,62	2,34	1,78	2,35	2,47
Mg^{2+}	РГ	1,47	0,69	1,15	1,30	0,80	1,50	1,39
	ПЗ	1,50	0,47	0,54	0,96	0,65	0,98	0,87
NH_4^+	РГ	7,86	4,81	6,61	7,64	6,93	6,86	8,10
	ПЗ	6,96	2,79	4,12	5,23	6,82	7,10	7,60
$Fe_{общ}$	РГ	1,09	1,66	2,28	2,55	2,46	2,36	2,37
	ПЗ	1,25	1,14	1,42	2,18	2,33	2,22	2,23
Cl^-	РГ	3,88	3,13	3,30	3,59	4,17	4,14	4,16
	ПЗ	3,12	1,91	2,36	3,31	3,56	3,49	3,71
SO_4^{2-}	РГ	14,2	3,25	4,22	2,87	3,97	3,09	4,13
	ПЗ	3,75	1,30	2,83	2,65	3,34	3,80	3,04
NO_3^-	РГ	2,43	2,39	2,40	2,20	2,44	2,83	2,85
	ПЗ	1,76	0,70	1,48	1,55	2,02	2,74	2,83
HCO_3^-	РГ	10,5	0,99	3,49	3,31	5,37	4,29	4,29
	ПЗ	3,89	5,12	2,84	4,18	4,77	2,23	3,01
ХПК	РГ	253,6	167	161,9	159,7	178,6	175,1	205
	ПЗ	195,2	126,3	126	135,4	151,8	175,1	180
CO_2	РГ	159,4	32,8	51,1	72,1	71,2	59,2	64,0
	ПЗ	112,2	19,9	28,2	35,5	67,7	35,9	32,7
$C_{орг}$	РГ	120,5	57,4	68,0	68,2	72,6	73,7	78,9
	ПЗ	77,0	42,7	52,8	57,5	61,5	61,7	67,0
$\Sigma_{и}$	РГ	50,2	20,8	28,0	28,3	30,1	30,8	34,9
	ПЗ	28,9	16,2	18,3	23,5	26,7	26,6	27,5
ЕС	РГ	51	46	51	54	58	54	62
	ПЗ	77	32	37	46	56	55	55
O_2	РГ	4,54	2,66	2,61	0,93	1,67	1,22	1,72
	ПЗ	3,29	4,80	2,95	0,92	1,36	2,69	1,46

Примечание: *отбор проб в зимний период на осушенном участке производился только в 2020 и 2021 гг.; РГ – осушенный участок, ПЗ – естественный участок.

Note: *winter water sampling at drained site was made only in 2020 and 2021; RG – drained area, P3 – pristine area.

В работе [35] отмечается рост pH в летне-осеннюю межень, тогда как наши данные показывают тенденцию к снижению pH болотных вод в условиях увеличения концентрации органических веществ в водах в летний период. Согласно данным [35] минерализация вод, со-

держание Fe в водах сопоставимы в весенний и летне-осенний период, а концентрации NH_4^+ немного снижаются осенью, тогда как наши данные показывают рост минерализации вод, а также концентраций $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NH_4^+ примерно в 1,8–2 раза соответственно от весны к осени.

Кластерный анализ, проведенный нами с использованием осредненных за сезон данных по химическому составу, показал достоверные различия для осушенного и естественного участков Васюганского болота, разделив их на 2 кластера (рис. 3). В первый кластер вошли пробы с осушенного участка за период после пожара 2017, 2019–2021 гг., пробы, отобранные в 2015, 2016 и 2018 гг. попали во второй кластер с пробами с естественного участка. При этом следует отметить, что пробы, отобранные на естественном и осушенном участках в маловодные 2016 и 2015 гг., согласно дендрограмме, выделились в отдельный подкластер, что связано с высокой теплообеспеченностью летних периодов в эти года и способствовало повышению концентраций всех компонентов химического состава вод в этот период. В 2018 г. среднегодовая температура воздуха и сумма активных температур была чуть ниже, в летний период выпало значительное количество осадков, что в связи с зарастанием каналов и за счет эффекта разбавления привело к снижению концентраций химических веществ в водах.

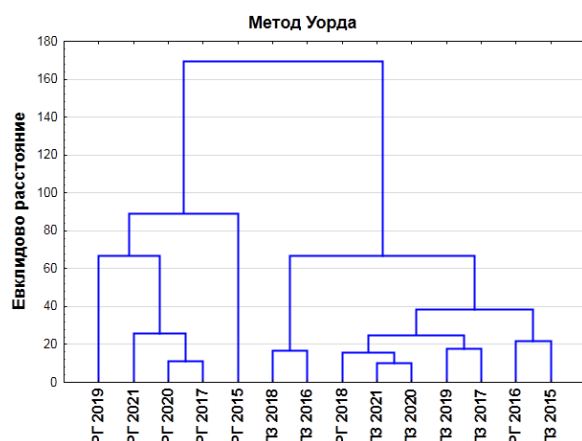


Рис. 3. Дендрограмма многолетних характеристик химического состава болотных вод осушенного (РГ) и естественного (ПЗ) участков Васюганского болота

Fig. 3. Dendrogram of the long-term data of water chemistry at drained (RG) and pristine (P3) parts of the Great Vasyugan mire

Поэтому по итогам кластерного анализа в 2015, 2016, 2018 гг. химический состав вод естественного и осушенного участков Васюганского болота был сопоставим. Исследования, проведенные в Канаде, также показали незначительное влияние осушения на химический состав вод болот, что определяется сходными климатическими условиями в Западной Сибири. Отмечено, что степень различия в химическом составе естественных и осушенных участков определяется скоростью разложения органических остатков и биогеохимических процессов в регионе, которая во многом зависит от среднегодовой температуры воздуха [36].

Кластерный анализ, проведенный на основании всех проб воды, отобранных в пределах естественного и осушенного участков, также показал наличие четырех кластеров. В первый кластер вошли пробы, отобранные в пределах естественного участка (ПЗ) Васюганского болота преимущественно в весенний период (апрель–май) 2015–2021 гг., также в него вошла проба, отобранная на осушенном участке (РГ) в апреле 2016 г. Болотные воды первого кластера за счет разбавления тальми снеговыми водами характеризуются наименьшими концентрациями Ca^{2+} и Mg^{2+} , которые в среднем составляют 1,60 и 0,61 мг/л соответственно. Концентрации ионов K^+ и Na^+ в водах равны 0,34 и 0,74 мг/л, что также значительно меньше в сравнении с пробами, вошедшими во второй кластер. Также в водах отмечено более низкое содержание NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , NO_3^- (рис. 4). Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в водах первого кластера преимущественно ниже, чем в остальных пробах вод с болота, и в среднем составляет 43,6 мг/л, но превышает данные по атмосферным осадкам. Среднее содержание в водах SO_4^{2-} составило 2,70 мг/л, что сопоставимо с содержанием в водах второго кластера. Наоборот, в водах отмечен более высокий pH (4,02), концентрации HCO_3^- (3,47 мг/л) и O_2 (4,19 мг/л), что отмечается в результате смешения с тальми снеговыми водами.

Во второй кластер вошла большая часть проб, отобранных на естественном участке в летне-осенний период (июнь–сентябрь) и 16 проб (41 %), отобранных в пределах осушенного участка преимущественно в весенне-летний период (апрель, май, июнь). Болотные воды характеризуются снижением величины pH (3,70) и содержания HCO_3^- (3,23 мг/л) за счет увеличения концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ (62,5 мг/л). В водах наблюдается повышение содержания Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , NO_3^- в 1,4–2 раза в сравнении с пробами вод, отобранными в весенний период (первый кластер). В третий кластер выделилось 29 проб, отобранных в пределах осушенного участка в летне-осенний период, а также 5 проб с естественного участка Васюганского болота. Обращает внимание, что в отдельный подкластер выделились 7 проб, в том числе 3 пробы с естественного участка, отобранные в периоды подъема уровней после продолжительной засухи, в августе 2015 г., сентябре 2017 г., июле–сентябре 2019 г., сентябре 2021 г. По химическому составу вод четвертый кластер отличается значимым повышением – в 2–3 раза – в пробах Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , CO_2 . Концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+} в водах в среднем составили 3,62 и 1,23 мг/л соответственно. Менее значимое повышение концентраций – в 1,3–1,8 раза относительно первого кластера – отмечено по следующим компонентам химического состава вод: K^+ , Na^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. При этом в водах отмечается снижение величины pH, в отдельных пробах до 2,98 единиц, а также уменьшается среднее содержание растворенного O_2 в водах (1,31 мг/л).

Анализ условий формирования химического состава вод в пределах осушенного участка за весь период отбора проб 2015–2021 гг. показал, что ведущим фактором, определяющим минерализацию (0,85) и

содержание в водах Ca^{2+} (0,68), Mg^{2+} (0,61), Cl^- (0,53), NH_4^+ (0,48), K^+ (0,40), SO_4^{2-} (0,41), HCO_3^- (0,66), $\text{C}_{\text{орг}}$ (0,62), является температура воды (0,66) и торфяной залежи в слое 1 м (0,71), а уровень болотных вод

находится преимущественно в обратной корреляции (–0,76), что свидетельствует о значительной роли эффекта разбавления (рис. 5).

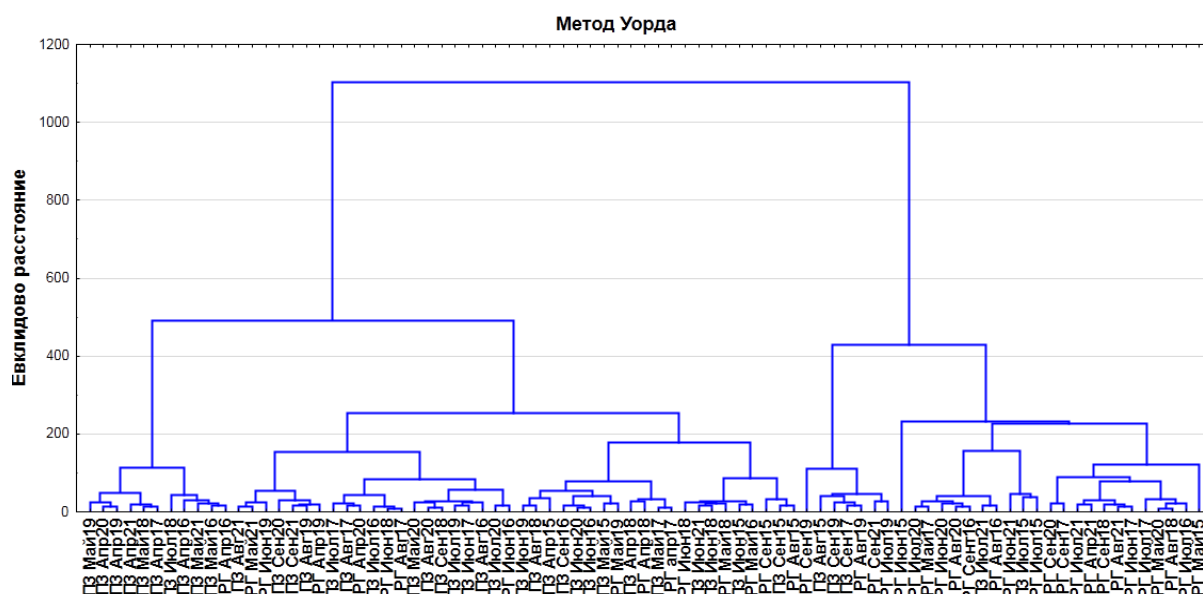


Рис. 4. Дендрограмма химического состава болотных вод осушенного (РГ) и естественного (ПЗ) участков Васюганского болота за период отбора проб с апреля по сентябрь 2015–2021 гг.

Fig. 4. Dendrogram of water chemistry at drained (RG) and pristine (P3) parts of the Great Vasyugan mire for the sampling period from April to September 2015–2021

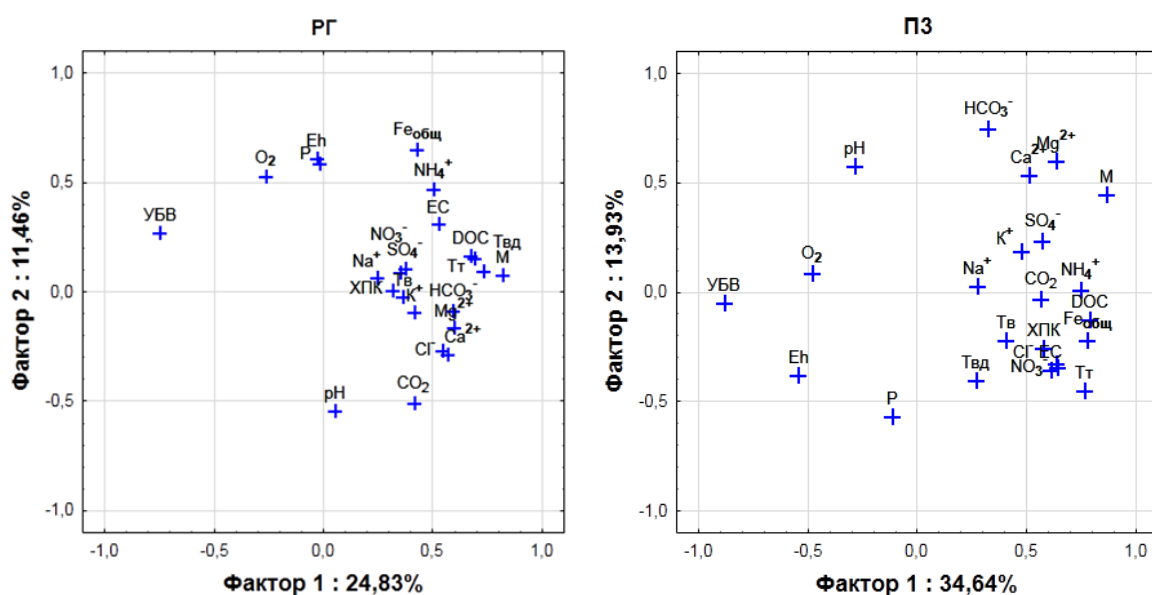


Рис. 5. Факторный анализ химического состава вод осушенного (РГ) и естественного (ПЗ) участков Васюганского болота (M – минерализация, мг/л; DOC (dissolved organic carbon) – растворенный углерод, мг/л; ХПК – химическое потребление кислорода, мгО/л; УБВ – уровень болотных вод в дату отбора проб, см; P – суммарное количество атмосферных осадков за 2 недели до отбора проб, мм; T_в – температура воздуха в дату отбора проб, °C; T_т – средняя температура торфяной залежи в слое 0–100 см в дату отбора проб, °C; T_м – температура болотных вод в дату отбора проб, °C)

Fig. 5. Diagrams of factor analysis of water chemistry at drained (RG) and pristine (P3) parts of the Great Vasyugan mire (M – total dissolved solids, mg/l; DOC – dissolved organic carbon, mg/l; COD – chemical oxygen demand, mgO/l; WTL – water table level, cm; P – total amount of precipitation for 2 weeks before sampling, mm; T_a – air temperature on the sampling date, °C; T_m – average temperature of the peat deposit in the 0–100 cm layer on sampling date, °C; T_{bo} – water temperature on sampling date, °C)

Содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в водах определяется в основном окислительно-восстановительными условиями среды и величиной pH, а также температурным режимом и количеством атмосферных осадков. Аналогично осушенному участку ведущим фактором формирования состава вод естественного участка Васюганского болота является температура торфяной залежи (0,76), которая находится в прямой корреляции с ЕС (0,61), с содержанием в водах Ca^{2+} (0,51), Mg^{2+} (0,63), NH_4^+ (0,74), $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (0,78), Cl^- (0,63), SO_4^{2-} (0,57), NO_3^- (0,64), ХПК (0,58), CO_2 (0,56), $\text{C}_{\text{орг}}$ (0,79) и в обратной зависимости с уровнем болотных вод (–0,88).

Заключение

Исследования показали, что под влиянием осушения в водах Васюганского болота отмечается повышенное содержание всех компонентов в сравнении с естественным участком, при этом достоверные различия отмечены по содержанию в водах Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. Гидрохимический режим болота характеризуется увеличением концентрации основных макрокомпонентов в марте вследствие концентрирования при промерзании торфяной залежи, снижением содержания элементов в водах в апреле в период снеготаяния, увеличением с июня по сентябрь, снижением концентраций в середине сезона при выпадении дождей. В многолетней динамике следует отметить маловодный 2015 г. – в этот год в болотных водах естественного и осушенного участков Васюганского болота были отмечены максимальные за исследуемый период концентрации Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ и минерализации вод.

В связи с зарастанием каналов происходит восстановление болота и химический состав вод осушенного и естественного участков Васюганского болота в отдельные периоды имеет минимальные различия, более существенные различия в содержании компонентов наблюдались в 2017, 2019–2021 гг., что являлось следствием пожара 2016 г. Кластерный анализ показал, что в 2015, 2016, 2018 гг. химический состав вод естественного и осушенного участков Васюганского болота был сопоставим, достоверные различия отмечались только по содержанию в водах Cl^- , NO_3^- , CO_2 , $\text{C}_{\text{орг}}$ и минерализации вод. Индикатором влияния пирогенного фактора на химический состав являлось повышение в болотных водах величины pH и содержания ионов K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , а также Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$. В 2017, 2019–2021 гг. достоверные различия в химическом составе осушенного и естественного участков отмечались по содержанию в водах Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , $\text{C}_{\text{орг}}$, ХПК, CO_2 и общей минерализации вод. Факторный анализ, проведенный с применением метода главных компонент, показал, что ведущим фактором формирования химического состава вод Васюганского болота является температурный режим, при этом повышение уровней болотных вод после продолжительных засушливых периодов приводит к повышению концентраций химических веществ в водах. Таким образом, исследования показали, что изменение климата, рост температуры воздуха и количества атмосферных осадков в регионе, вероятно, будет способствовать выносу биогенных элементов и органических веществ с болот и повышению их концентрации в речных водах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00242.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: the concept and a practical approach in Estonian mires / L. Remm, A. Lõhmus, E. Leibak, M. Kohv, J.-O. Salm, P. Lõhmus, R. Rosenvald, K. Runnel, K. Vellak, R. Rannap // Journal of Environmental Management. – 2019. – № 250. – 109439. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109439
2. Catchment water quality in the year preceding and immediately following restoration of a drained afforested blanket bog / P. Gaffney, R. Andersen, M. Taggart, M. Hancock // Biogeochemistry. – 2021. – № 153. – P. 243–262. URL: <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00782-y> (дата обращения 15.05.2022).
3. Water quality and the biodegradability of dissolved organic carbon in drained boreal peatland under different forest harvesting intensities / M. Palviainen, E. Peltomaa, A. Laurén, N. Kinnunen, A. Ojala, F. Berninger, Z. Xudan, J. Pumpanen // Science of the Total Environment. – 2022. – № 806 (4). – 150919. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150919> (дата обращения 15.05.2022).
4. Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments – Changes driven by climate and deposition / A. Lepistö, A. Räike, T. Sallantausta, L. Finér // Science of the Total Environment. – 2021. – № 780. – 146627. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146627> (дата обращения 15.05.2022).
5. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback / T. Ise, A. Dunn, S. Wofsy, P.R. Moorcroft // Nature Geoscience. – 2008. – № 1. – P. 763–766. URL: <https://doi.org/10.1038/ngeo331> (дата обращения 15.05.2022).
6. Widespread drying of European peatlands in recent centuries / G.T. Swindles, P.J. Morris, D.J. Mullan, R.J. Payne, T.P. Roland, M.J. Amesbury, M. Lamentowicz, T.E. Turner, A. Gallego-Sala, T. Sim, I.D. Barr, M. Blaauw, A. Blundell, F.M. Chambers, D.J. Charman, A. Feurdean, J.M. Galloway, M. Gafka, S. Green, K. Kajukala, E. Karofeld, A. Korhola, L. Lamentowicz, P. Langdon, K. Marcisz, D. Mauquoy, Y.A. Mazei, M. McKeown, E.A.D. Mitchell, E. Novenko, G. Plunkett, H.M. Roe, K. Schoning, Ü. Sillasoo, A.N. Tsyganov, M. van der Linden, M. Valiranta, B. Warner // Nature Geoscience. – 2019. – № 12. – 922e928.
7. Worldwide peatland degradations and the related carbon dioxide emissions: the importance of policy regulations / I. Urák, T. Hartel, R. Gallé, A. Balog // Environmental Science & Policy. – 2017. – № 69. – P. 57–64. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.12.012
8. Rewetting decreases carbon emissions from the Zoige Alpine Peatland on the Tibetan Plateau / L. Cui, X. Kang, W. Li, Y. Hao, Y. Zhang, J. Wang, L. Yan, X. Zhang, M. Zhang, J. Zhou, P. Kardol // Sustainability. – 2017. – № 9 (6). – 948. URL: <https://doi.org/10.3390/su9060948> (дата обращения 15.05.2022).
9. Broder T., Biester H. Linking major and trace element concentrations in a headwater stream to DOC release and hydrologic conditions in a bog and peaty riparian zone // Applied Geochemistry. – 2017. – № 87. – P. 188–201. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.11.0
10. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // Applied Geochemistry. – 2020. – № 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.1045
11. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: impacts of soil type, hydrology and vegetation / C.R. Walton, D. Zak, J. Audet, R.J. Petersen, J. Lange, C. Oehmke, W. Wichtmann, J. Kreyling, M. Grygoruk, E. Jabłońska, W. Kotowski, M. Wiśniewska, R. Ziegler, C.C. Hoffmann // Science of The Total Environment. – 2020. – 138709. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.1387

12. Howie S.A., Hebda R.J. Bog surface oscillation (mire breathing): a useful measure in raised bog restoration // *Hydrological Processes*. – 2018. – № 32 (11). – P. 1518–1530. DOI: 10.1002/hyp.11622
13. Bourgault M.-A., Larocque M., Garneau M. Quantification of peatland water storage capacity using the water table fluctuation method // *Hydrological Processes*. – 2017. – № 31 (5). – P. 1184–1195. DOI: 10.1002/hyp.11116
14. The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands / T. Haapalehto, J.S. Kotiaho, R. Matilainen, T. Tahvanainen // *Journal of Hydrology*. – 2014. – V. 519. – P. 1493–1505. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.013
15. Effects of drainage on dissolved organic carbon (DOC) characteristics of surface water from a mountain peatland / X. Xu, K. Lu, Z. Wang, M. Wang, S. Wang // *Science of The Total Environment*. – 2021. – № 789. – P. 147848. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.1478
16. Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters / L. Finér, A. Lepistö, K. Karlsson, A. Räsänen, L. Härkönen, M. Huttunen, S. Joensuu, P. Kortelainen, T. Mattsson, S. Piirainen, S. Sallantausta, S. Sarkkola, S. Tattari, L. Ukonmaanaho // *Science of The Total Environment*. – 2021. – № 762. – P. 144098. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.1440
17. Effect of drainage and wildfire on peat hydrophysical properties / J.H. Sherwood, N. Kettridge, D.K. Thompson, P.J. Morris, U. Silins, J.M. Waddington // *Hydrological Processes*. – 2013. – № 27 (13). – P. 1866–1874. DOI: 10.1002/hyp.9820
18. Browning of freshwaters: consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures / E.S. Kritzberg, E.M. Hasselquist, M. Škerlep, S. Löfgren, O. Olsson, J. Stadmark, S. Vilinla, L.-A. Hansson, H. Laudon // *Ambio*. – 2020. – № 49 (2). – P. 375–390. URL: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5> (дата обращения 15.05.2022).
19. Оценка антропогенной деградации болот Западной Сибири на примере верхового болота в бассейне реки Гавриловка / А.А. Малолетко, Е.С. Иванова, Ю.А. Харанжевская, А.А. Синюткина, Л.П. Гашкова // Тринадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу: Тезисы докладов российской конференции. – Томск: Аграф-Пресс, 2019. – С. 204–205.
20. 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. – P. 105464. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464> (дата обращения 15.05.2022).
21. 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. Strel'nikova, E.K. Vishnyakova, Yu.A. Kharanzhevskaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. – 2020. – V. 408. – P. 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
22. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring / M.V. Kiselev, N.N. Voropay, E.A. Dyukarev, S.A. Kurakov, P.S. Kurakova, E.A. Makeev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – V. 190. – P. 012031. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/190/1/012031> (дата обращения 15.05.2022).
23. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. – М.: Форум, 2011. – 464 с.
24. Muller F.L.L., Tankéré-Muller S.P.C. Seasonal variations in surface water chemistry at disturbed and pristine peatland sites in the Flow Country of northern Scotland // *Science of The Total Environment*. – 2012. – № 435–436. – P. 351–362. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.0
25. Бульгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества атмосферных осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТ) Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation/описание-массива-данных> (дата обращения 15.05.2022).
26. Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Михайлова А.В. Изменение химического состава болотных вод после пожаров 2010 года (на примере водосбора Иваньковского водохранилища) // *Труды Института*. – 2011. – № 4 (57). – С. 12–16.
27. 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.
28. 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. – P. 141142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141142
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. – P. 928. – P. 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006
30. Синюткина А.А., Харанжевская Ю.А. Мониторинг атмосферных выпадений Zn, Cu, Cd, Pb в пределах участка Большого Васюганского болота // *Оптика атмосферы и океана*. – 2020. – Т. 33. – № 6. – С. 448–452. DOI: 10.15372/AOO20200605
31. Воистинова Е.С., Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А. Особенности гидрохимического режима северо-восточной части Васюганского болота в междуречье рек Бакчар и Икса (Западная Сибирь) // *Водное хозяйство России*. – 2018. – № 3. – С. 16–34.
32. Харанжевская Ю.А., Чудиновская Л.А., Синюткина А.А. Сезонная вариация условий формирования химического состава вод северо-восточной части Васюганского болота // Тринадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатологическому мониторингу: Тезисы докладов российской конференции. – Томск: Аграф-Пресс, 2019. – С. 240–241.
33. Калюжный И.Л. Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // *Метеорология и гидрология*. – 2018. – № 8. – С. 72–81.
34. Калюжный И.Л. Гидрохимический режим и химический состав мезоэкологических болотных массивов Колыского полуострова // *Вестник Карельского научного центра РАН*. – 2016. – № 3. – С. 114–125.
35. 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.
36. Limited effect of drainage on peat properties, porewater chemistry, and peat decomposition proxies in a boreal peatland / L.I. Harris, T.R. Moore, N.T. Roulet, A.J. Pinsonneault // *Biogeochemistry*. – 2020. DOI: 10.1007/s10533-020-00707-1

Поступила 29.06.2022 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.

SEASONAL AND LONG-TERM DYNAMICS OF WATER CHEMISTRY WITHIN THE DRAINED PART OF THE GREAT VASYUGAN MIRE

Yulia A. Kharanzhevskaya,
kharan@yandex.ru

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

The relevance of the study is caused by the need to assess the transformation of water chemistry under the influence of climate change and economic activity.

The aim: to study the effects of drainage on water chemistry of the Great Vasyugan mire, to estimate the conditions, seasonal and long-term changes under the influence of drainage.

Objects: northeastern part of the Great Vasyugan mire close to Polynyanka village, Bakchar district, Tomsk region.

Methods. Laboratory analysis was carried out by titrimetry, spectrophotometry, flame photometry at the Laboratory and Analytical Center of the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat. Statistical analysis of the data made using the non-parametric Mann–Whitney test, cluster analysis and the Principal component analysis.

Results. The studies shown that as a result of the forest reclamation, as well as because of the fire in 2016, in the waters of the northeastern section of the Great Vasyugan mire, in comparison with its natural part, there is a statistically significant increase in the concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_{total} , NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- , DOC. However, at present, due to the overgrowing of ditches, the mire self-restoration is noted, as a result of which the water chemistry of the drained and pristine areas of the Great Vasyugan mire has minimal differences in 2015, 2016, 2018, more significant differences in water chemistry due to fire event are observed in 2017, 2019–2021. The indicator of the influence of the pyrogenic factor on the water chemistry was an increase in the pH value and the content of K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , as well as Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_{total} . Principal component analysis showed that the leading factor in water chemistry formation is the temperature regime, while the increase in the water levels after long dry periods leads to increase in the concentrations in the waters.

Key words:

Mire waters, chemical composition, forest reclamation, influence, Great Vasyugan mire, Western Siberia.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-27-00242.

REFERENCES

1. Remm L., Lõhmus A., Leibak E., Kohv M., Salm J.-O., Lõhmus P., Rosenvald R., Runnel K., Vellak K., Rannap R. Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and a practical approach in Estonian mires. *Journal of Environmental Management*, 2019, no. 250, 109439. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109439
2. Gaffney P., Andersen R., Taggart M., Hancock M. Catchment water quality in the year preceding and immediately following restoration of a drained afforested blanket bog. *Biogeochemistry*, 2021, no. 153, pp. 243–262. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00782-y> (accessed 15 May 2022).
3. Palviainen M., Peltomaa E., Laurén A., Kinnunen N., Ojala A., Berninger F., Xudan Z., Pumpanen J. Water quality and the biodegradability of dissolved organic carbon in drained boreal peatland under different forest harvesting intensities. *Science of the Total Environment*, 2022, no. 806, 150919. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150919> (accessed 15 May 2022).
4. Lepistö A., Räike A., Sallantausta T., Finér L. Increases in organic carbon and nitrogen concentrations in boreal forested catchments – Changes driven by climate and deposition. *Science of the Total Environment*, 2021, no. 780, 146627. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146627> (accessed 15 May 2022).
5. Ise T., Dunn A., Wofsy S., Moorcroft P.R. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback. *Nature Geoscience*, 2008, no. 1, pp. 763–766. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo331> (accessed 15 May 2022).
6. Swindles G.T., Morris P.J., Mullan D.J., Payne R.J., Roland T.P., Amesbury M.J., Lamentowicz M., Turner T.E., Gallego-Sala A., Sim T., Barr I.D., Blaauw M., Blundell A., Chambers F.M., Charman D.J., Feurdean A., Galloway J.M., Galka M., Green S., Kajukalo K., Karofeld E., Korhola A., Lamentowicz L., Langdon P., Marcisz K., Mauquoy D., Mazei Y.A., McKeown M., Mitchell E.A.D., Novenko E., Plunkett G., Roe H.M., Schoning K., Sillasoo Ü., Tsyganov A.N., Van der Linden M., Valiranta M., Warner B. Widespread drying of European peatlands in recent centuries. *Nature Geoscience*, 2019, no. 12, 922e928.
7. Urák I., Hartel T., Gallé R., Balog A. Worldwide peatland degradations and the related carbon dioxide emissions: the importance of policy regulations. *Environmental Science & Policy*, 2017, no. 69, pp. 57–64. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.12.012
8. Cui L., Kang X., Li W., Hao Y., Zhang Y., Wang J., Yan L., Zhang X., Zhang M., Zhou J., Kardol P. Rewetting decreases carbon emissions from the Zoige Alpine Peatland on the Tibetan Plateau. *Sustainability*, 2017, no. 9 (6), 948. Available at: <https://doi.org/10.3390/su9060948> (accessed 15 May 2022).
9. Broder T., Biester H. Linking major and trace element concentrations in a headwater stream to DOC release and hydrologic conditions in a bog and peaty riparian zone. *Applied Geochemistry*, 2017, no. 87, pp. 188–201. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.11.0
10. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, no. 113, 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.1045
11. Walton C.R., Zak D., Audet J., Petersen R.J., Lange J., Oehmke C., Wichtmann W., Kreyling J., Grygoruk M., Jabłońska E., Kotowski W., Wiśniewska M., Ziegler R., Hoffmann C.C. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: Impacts of soil type, hydrology and vegetation. *Science of the Total Environment*, 2020, 138709. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.1387
12. Howie S.A., Hebda R.J. Bog surface oscillation (mire breathing): a useful measure in raised bog restoration. *Hydrological Processes*, 2018, no. 32 (11), pp. 1518–1530. DOI: 10.1002/hyp.11622
13. Bourgault M.-A., Larocque M., Garneau M. Quantification of peatland water storage capacity using the water table fluctuation

- method. *Hydrological Processes*, 2017, no. 31 (5), pp. 1184–1195. DOI: 10.1002/hyp.11116
14. Haapalehto T., Kotiaho J.S., Matilainen R., Tahvanainen T. The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands. *Journal of Hydrology*, 2014, no. 519, pp. 1493–1505. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.013
 15. Xu X., Lu K., Wang Z., Wang M., Wang S. Effects of drainage on dissolved organic carbon (DOC) characteristics of surface water from a mountain peatland. *Science of The Total Environment*, 2021, no. 789, 147848. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147848
 16. Finér L., Lepistö A., Karlsson K., Räike A., Härkönen L., Huttunen, M., Joensuu S., Kortelainen P., Mattsson T., Piirainen S., Sallantausta T., Sarkkola S., Tattari S., Ukonmaanaho L. Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. *Science of The Total Environment*, 2021, no. 762, 144098. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144098
 17. 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), pp. 1866–1874. DOI: 10.1002/hyp.9820
 18. Kritzberg E.S., Hasselquist E.M., Škerlep M., Löfgren S., Olsson O., Stadmark J., Vilinina S., Hansson L.-A., Laudon H. Browning of freshwaters: consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio*, 2020, no. 49, pp. 375–390. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5> (accessed 15 May 2022).
 19. Maloletko A.A., Ivanova E.S., Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Otsenka antropogennoy degradatsii bolot Zapadnoy Sibiri na primere verkhovogo bolota v basseyn reki Gavrilovka [Assessment of anthropogenic degradation of Western Siberian bogs on the example of a raised bog in the Gavrilovka river basin]. *Trinadtsatoye Sibirskoye soveshchaniye i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskoy monitoring. Tezisy dokladov Rossiyskoy konferentsii* [Thirteenth Siberian Conference and the School of Young Scientists on Climate and Ecological Monitoring. Abstracts of the Russian Conference]. Tomsk, Agraf-Press, 2019. pp. 204–205.
 20. 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 May 2022).
 21. 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 Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 408, 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012037
 22. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, no. 190, 012031. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/190/1/012031> (accessed 15 May 2022).
 23. 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.
 24. Muller F.L.L., Tankeré-Muller S.P.C. Seasonal variations in surface water chemistry at disturbed and pristine peatland sites in the Flow Country of northern Scotland. *Science of The Total Environment*, 2012, no. 435–436, pp. 351–362. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.0
 25. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR) Certificate of state registration of the database No. 2014620942/* Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#data-array-description> (accessed 15 May 2022).
 26. 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.
 27. 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.
 28. 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
 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 Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, no. 928, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006
 30. Sinyutkina A.A., Kharanzhevskaya Yu.A. Monitoring of atmospheric deposition of Zn, Cu, Cd, and Pb within the area of the Great Vasyugan mire. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, no. 6. DOI: 10.15372/AOO20200605
 31. Voistina E.S., Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Features of the hydrochemical regime of the northeastern part of the Great Vasyugan mire in the interfluvium of the Bakchar and Iksha rivers (Western Siberia). *Water Management of Russia*, 2018, no. 3, pp. 16–34. In Rus.
 32. Kharanzhevskaya Yu.A., Chudinovskaya L.A., Sinyutkina A.A. Sezonnaya variatsiya usloviy formirovaniya khimicheskogo sostava vod severo-vostochnoy chasti Vasyuganskogo bolota [Seasonal variation of the conditions water chemistry formation in the northeastern part of the Great Vasyugan Mire]. *Trinadtsatoye Sibirskoye soveshchaniye i shkola molodykh uchenykh po klimato-ekologicheskoy monitoringu* [Thirteenth Siberian meeting and the school of young scientists on climate and environmental monitoring]. Tomsk, Agraf-Press, 2019. pp. 240–241.
 33. Kalyuzhny I.L. General features of the formation of the hydrochemical regime of the main types of mires in Russia. *Meteorology and hydrology*, 2018, no. 8, pp. 72–81. In Rus.
 34. Kalyuzhny I.L. Hydrochemical regime and water chemical composition of mezoooligotrophic bog on the Kola Peninsula. *Bulletin of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, no. 3, pp. 114–125. In Rus.
 35. Savichev O.G., Mazurov A.K. Changes of chemical composition of waters in the east part of the Vasyugan mire (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 38–48. In Rus.
 36. Harris L.I., Moore T.R., Roulet N.T., Pinsonneault A.J. Limited effect of drainage on peat properties, porewater chemistry, and peat decomposition proxies in a boreal peatland. *Biogeochemistry*, 2020. DOI: 10.1007/s10533-020-00707-1

Received: 29 June 2022.

Information about the authors

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