

Оценка изменений гидрологического режима и химического состава вод Васюганского болота под влиянием осушения и пирогенного фактора*

Ю. А. Харанжевская

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа, филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Российская Федерация, 634050, Томск, ул. Гагарина, 3

Для цитирования: Харанжевская, Ю. А. (2024). Оценка изменений гидрологического режима и химического состава вод Васюганского болота под влиянием осушения и пирогенного фактора. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (3), 453–471. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.304>

В статье проведена оценка изменений уровня режима Васюганского болота, химического состава вод и потоков макрокомпонентов, органических веществ в системе «болото — река» в таежной зоне Западной Сибири и их трансформации под влиянием лесомелиорации, пирогенного фактора и природно-климатических изменений. Анализ гидрологического режима показал, что на осушенном участке Васюганского болота отмечено достоверное снижение уровней и увеличение амплитуды их колебания в 1.6 раза. Влияние пирогенного фактора выражается в повышении отметок среднегодовых уровней болотных вод и амплитуды их колебания. В химическом составе вод осушенного участка Васюганского болота отмечено повышение концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$. В речных водах наблюдается рост содержания NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , а также $\text{C}_{\text{орг}}$. Влияние пирогенного фактора на химический состав выражается в повышении в 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 связи с зарастанием каналов наблюдается процесс самовосстановления болота, а вблизи каналов формируются зоны подпора, и происходит увеличение колебаний уровней, как следствие химический состав вод осушенного и естественного участков Васюганского болота в отдельные периоды имеет минимальные отличия. Исследования показали, что вынос химических веществ с осушенного участка Васюганского болота преобладал в 2015 г. и составил 1896 т, из которых вынос $\text{C}_{\text{орг}}$ был равен 42 %, или 789 т. В перспективе изменения 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 в летний период.

Ключевые слова: болото, река, осушение, пирогенный фактор, химический состав вод, уровень режим, Западная Сибирь.

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

1. Введение и постановка проблемы

Западная Сибирь является крупным регионом в Северном полушарии с широким распространением болот (Лисс и др., 2001). Болота занимают обширные площади на террасах и в междуречьях, оказывают влияние на температурный режим и водный баланс региона, влияют на химический состав и качество вод р. Оби и ее притоков, тем самым в значительной мере определяют состав общего потока минеральных и органических веществ в Северный Ледовитый океан (Berezin et al., 2014; Savichev et al., 2016). Сибирь характеризуется наибольшей скоростью изменения температуры приземных слоев атмосферы ($1.39^{\circ}\text{C}/100$ лет), которая существенно превышает среднюю скорость по Северной Евразии и Северной Азии, Арктике и по всему Северному полушарию (Groisman and Gutman, 2013). В регионе отмечаются увеличение количества атмосферных осадков и смена режима их выпадения, которая выражается в повышении экстремальных ливневых осадков в летне-осенний период (Харюткина и др., 2019). Рост температуры воздуха приводит к увеличению частоты возникновения природных пожаров, что характерно для Сибири и других регионов (Kharuk et al., 2021) и связано с засушливыми условиями в летний период. Особенно подвержены влиянию изменения климата и пожарам осушенные болота, которые зачастую выгорают в связи со снижением в них уровня воды, что весьма негативно сказывается на качестве вод рек-водоприемников. В настоящее время детально изучен химический состав вод естественных болот Западной Сибири (Потапова и др., 2020; Савичев и др., 2018; Калужный, 2018), имеются данные о характере их гидрологического режима, однако данные по осушенным и выгоревшим болотам весьма ограничены. Целью данной работы является оценка изменений уровня режима Васюганского болота и потоков макрокомпонентов, органических веществ в системе «болото — река» в таежной зоне Западной Сибири и их трансформации под влиянием лесомелиорации, а также пирогенного фактора.

2. Методика исследования и фактический материал

Исследования проводились в пределах модельного водосбора малой р. Гавриловки, левобережного притока р. Иксы бассейна Средней Оби. Модельный водосбор р. Гавриловки (площадь 81 км^2) располагается на территории осушенного участка Васюганского болота, дренажная сеть занимает 39 км^2 . Осушение болота для лесоразведения проведено в 1980-х годах сетью открытых каналов с расстоянием 160–180 м, в настоящее время отмечается зарастание осушительных каналов и восстановление скорости торфонакопления (Sinyutkina, 2021). В 2016 г. на территории водосбора произошел пожар, в результате которого выгорел участок площадью 3.10 км^2 , мощность горелого слоя составила от 5 до 15 см (Sinyutkina et al., 2020). В качестве фоновой территории был использован аналогичный естественный участок Васюганского болота, расположенный в восьми километрах севернее, в границах водосбора малой р. Ключ, правобережного притока р. Бакчар (площадь водосбора 76 км^2). Территория исследований характеризуется слабым развитием инфраструктуры, а объекты находятся в 200 км от основных источников загрязнения (рис. 1).

Отбор проб болотной воды осуществляли с глубины 40–50 см с периодичностью один раз в месяц с апреля по сентябрь 2015–2022 гг. из специально оборудо-

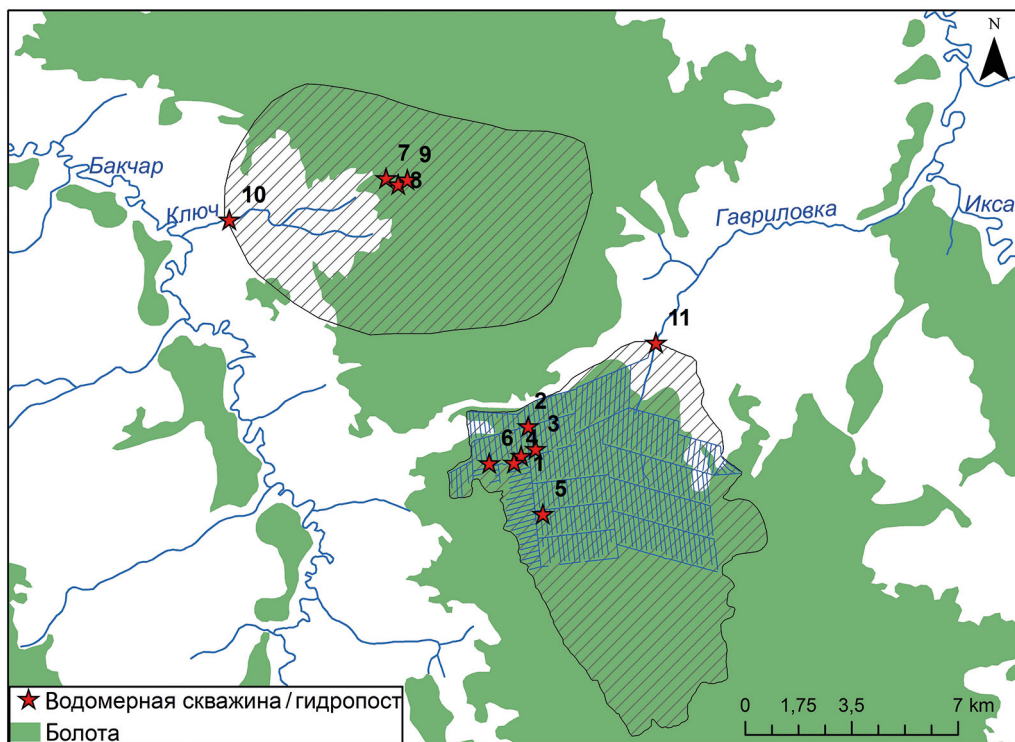


Рис. 1. Схема расположения территории исследования (цифровая картографическая основа Томской области масштаба 1:200000, ОАО «Томскгеомониторинг»): 1 — РГ; 2 — РГ2; 3 — РГ3; 4 — ПГ2; 5 — ТГ; 6 — Д2; 7 — П3; 8 — П5; 9 — Д1; 10 — гидропост на р. Ключ; 11 — гидропост на р. Гавриловке

ванных скважин глубиной 1 м. В 2022 г. для оценки пространственной вариации химического состава болотных вод производился отбор проб на осушенном участке Васюганского болота в бассейне р. Гавриловки в пределах сосново-кустарничково-сфагновых болотных микроландшафтов (РГ, РГ2, РГ3), осоково-сфагнуовой топи (ТГ) и грядово-мочажинного комплекса (Д2). Также был выполнен отбор проб болотных вод в пределах частично выгоревшего сосново-кустарничково-сфагнуового микроландшафта (ПГ2) в бассейне р. Гавриловки. На фоновом водосборе р. Ключ (естественный участок Васюганского болота) отбор проб проводили в аналогичных болотных микроландшафтах: сосново-кустарничково-сфагнуовый (П3), осоково-сфагнуовая топь (П5) и грядово-мочажинный комплекс (Д1). Для анализа макрокомпонентного состава и содержания органических веществ производился отбор проб речных вод с периодичностью 1 раз в месяц с апреля по сентябрь 2015–2022 гг. Химический анализ болотных и речных вод выполняли с применением аттестованных методик в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского НИИ сельского хозяйства и торфа, филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН. Концентрацию CO_2 , HCO_3^- , Cl^- в воде устанавливали титриметрическим методом; $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} — спектрофотометрическим методом (Specol-1300, Analytik Jena AG, Германия); концентрацию ионов K^+ , Na^+ — методом пламенной фотометрии (ПФА-378, Россия). Минерализацию вод оценивали по

сумме ионов. Содержание $C_{орг}$ в болотных водах определяли в соответствии с СТП 0493925-008-93¹.

Измерения уровней болотных вод (УБВ) производились с применением регистраторов Solinst Levellogger (Канада) и датчиков давления (Kiselev et al., 2018) с периодичностью 1 ч, в 2015–2022 г. Для мониторинга уровня режима Васюганского болота были организованы скважины в торфяной залежи, в которые устанавливались ПВХ-трубы с перфорацией через 5 см. Компенсация данных по уровням болотных вод на величину атмосферного давления проводилась с применением датчиков давления Solinst BaroLevellogger (Канада). Оголовок скважины привязывался к средней поверхности в исследуемом болотном микроландшафте. Средняя поверхность определялась как среднее положение повышений и понижений микрорельефа в месте организации скважины, определенное по линии таксации согласно (Наставление..., 1990). Уровни болотных вод измерялись в сантиметрах относительно средней поверхности.

Анализ пространственной вариации уровней болотных вод выполнен по данным, полученным с регистраторов уровней Solinst, установленных в 2022 г. Измерения расходов воды осуществлены с применением акустического измерителя скорости потока ОТТ Hydromet (Германия) методом «скорость — площадь» на гидрометрических постах, организованных на реках Ключ и Гавриловке. Гидрометрические работы проводились в характерные периоды водности реки в 2015–2022 гг. Вынос веществ рассчитывался как произведение суммарного объема стока и концентраций химических веществ в р. Гавриловке, полученных по результатам лабораторного анализа проб речных вод. Статистический анализ данных включал в себя оценку значимости различий в уровненом режиме и химическом составе с применением непараметрических критериев Уилкоксона и Манна — Уитни, а также факторный анализ. Факторный анализ условий, определяющих вынос органических и минеральных веществ с водами р. Гавриловки, дренирующей осушенный участок Васюганского болота, проводился с применением метода главных компонент (Principal component analysis) в программе Statistica 10.

3. Результаты исследований

Анализ данных за период с 1970 по 2022 г. по метеостанции у с. Бакчар в Томской области показывает статистически значимый рост среднегодовой температуры воздуха в марте (+2.2 °С), в апреле (+1.2 °С), в мае (+2.3 °С), в октябре (+1.7 °С) и в среднем за год (+1 °С) (рис. 2, табл.). Среднегодовое значение температуры воздуха за период с 1970 по 2022 г. составила 0.16 °С. За 7 лет наиболее теплообеспеченными являлись 2015 и 2020 гг., среднегодовая температура воздуха составила 2.05–3.03 °С соответственно, что стало абсолютным максимумом за период наблюдений с 1970 по 2022 г. По количеству атмосферных осадков можно выделить 2015 и 2018 гг., годовая сумма осадков в эти годы составила 616 и 677 мм соответственно. Однако статистически значимого увеличения количества атмосферных осадков по метеостанции у с. Бакчар за период с 1970 по 2022 г. не обнаружено. При этом в 2018 г.

¹ СТП 0493925-008-93. Определение углерода водорастворимых соединений по методу Тюрина в модификации СибНИИТ. 1993.

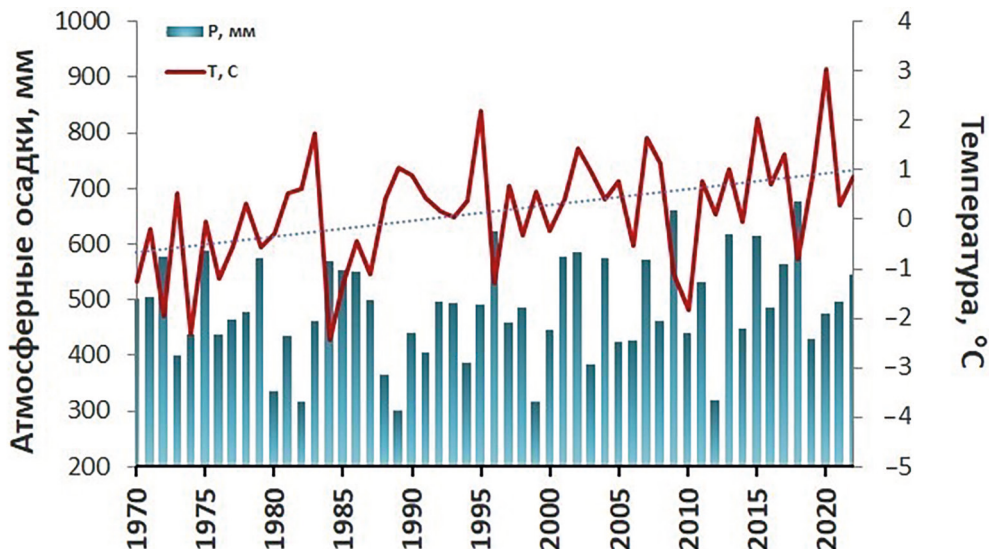


Рис. 2. Многолетняя динамика температуры воздуха (Т) и суммы атмосферных осадков (Р) по метеостанции у с. Бакчар. Данные взяты с сайта <http://meteo.ru/>

Таблица. Гидрометеорологические условия за период совместных наблюдений, согласно данным метеорологической станции у с. Бакчар*

Год	Сумма осадков, мм		Среднегодовая температура воздуха, °С	Сумма активных температур (Т > 10 °С), °С	УБВ средний за год, см осушенный/ естественный	Среднегодовой расход воды, м ³ /с р. Гавриловка / р. Ключ
	за год	за апрель — сентябрь				
2015	616	382	2.05	1972	-25/-22	0.466/0.243
2016	486	348	0.72	2162	-30/-25	0.223/0.205
2017	566	419	1.30	1891	-33/-19	0.138/0.341
2018	677	495	-0.80	1781	-29/-18	0.315/0.487
2019	431	284	0.88	1860	-32/-21	0.251/0.243
2020	477	293	3.03	2136	-34/-18	0.157/0.162
2021	497	311	0.29	1888	-32/-15	0.188/0.215
2022	545	376	0.86	1905	-31/-13	0.157/0.220

* Составлено по данным сайта <http://meteo.ru/>

был отмечен абсолютный максимум по годовой сумме осадков за многолетний период. Среднегодовая сумма атмосферных осадков по метеостанции у с. Бакчар за период с 1970 по 2022 г. составила 486 мм.

Анализ гидрологического режима р. Ключ показал более высокие расходы воды в 2018, а также в 2017 гг., что согласуется также с существенным увеличением количества атмосферных осадков в эти годы — до 566 мм. Снижение расходов воды

в р. Ключ отмечено в теплообеспеченный 2020 г. — до $0.162 \text{ м}^3/\text{с}$, а в остальные годы расходы воды повышаются до $0.206\text{--}0.232 \text{ м}^3/\text{с}$. Отмечается весьма тесная корреляция среднегодовых расходов воды в р. Ключ с годовыми суммами атмосферных осадков ($r=0.76$) и суммами температур выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ($r=-0.69$), а корреляция с уровнями болотных вод отсутствует ($r=0.05$). Однако важно отметить, что анализ ежедневных данных отдельно за каждый год все же показал корреляцию между уровнями болотных вод естественного участка Васюганского болота и расходами воды в р. Ключ ($r=0.46\text{...}0.88$). Анализ гидрологического режима р. Гавриловки показал в целом сходную тенденцию в изменении расходов воды за исследуемый период. Однако следует отметить резкое повышение расходов воды в р. Гавриловке в 2015 г. в отличие от р. Ключ, что свидетельствует, вероятно, о влиянии лесомелиорации на водный режим, которое выражается в увеличении стока с болот. Однако в последующие годы отмечается снижение расходов воды, с минимумом в 2017 г. — в первый год после пожара, который охватил территорию водосбора площадью 3.10 км^2 . При этом отмечается тесная корреляция расходов воды в р. Гавриловке с атмосферными осадками ($r=0.51$) и уровнями болотных вод ($r=0.92$) и ее отсутствие с суммами температур выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ($r=-0.14$). Данные по гидрологическому режиму пирогенных участков Васюганского болота (Харанжевская, 2022) показывают, что после пожара увеличивается амплитуда колебания уровней, в периоды высокой водности, как правило, уровни выше, чем на ненарушенных участках болота, а в межженный период отмечается более существенное их снижение за счет уменьшения водоудерживающих свойств торфяной залежи.

Анализируя вариацию среднегодовых уровней болотных вод за период с 2015 по 2022 г., можно отметить, что гидрологические режимы естественного и осушенного участков Васюганского болота различаются. Так, в пределах естественного участка отмечается планомерный рост отметок среднегодовых уровней болотных вод за исследуемый период, при этом наблюдается практически полное отсутствие корреляции с годовой суммой атмосферных осадков ($r=0.34$). Умеренная корреляция уровней болотных вод естественного участка Васюганского болота отмечена только с суммой активных температур выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ($r=-0.46$), что свидетельствует о более существенном влиянии термического фактора на гидрологический режим болота. В целом рост уровней болотных вод, вероятно, определяется процессами аккумуляции влаги в торфяной залежи на естественной части Васюганского болота в условиях снижения мощности мерзлого слоя при увеличении среднегодовой температуры воздуха, как это было отмечено на болотах европейской территории России (Батуев и Калужный, 2020). Анализ гидрологического режима осушенного участка Васюганского болота за период с 2015 по 2022 г. показал отсутствие положительного тренда, при этом отмечается более тесная корреляционная связь среднегодовых уровней болотных вод с годовыми суммами атмосферных осадков ($r=0.61$), а термический фактор играет меньшую роль в формировании уровня режима ($r=-0.11$).

Анализ динамики уровней болотных вод за 2015–2022 гг. показал, что в сравнении с естественными участками Васюганского болота (низкий рям, бассейн р. Ключ) на участке лесомелиорации за счет работы осушительной сети наблюдаются более низкие отметки уровней болотных вод и различия статистически достоверны (критерий Уилкоксона, $Z=46.8$; $p<0.05$). За период наблюдений с 2015 по 2022 г. уро-

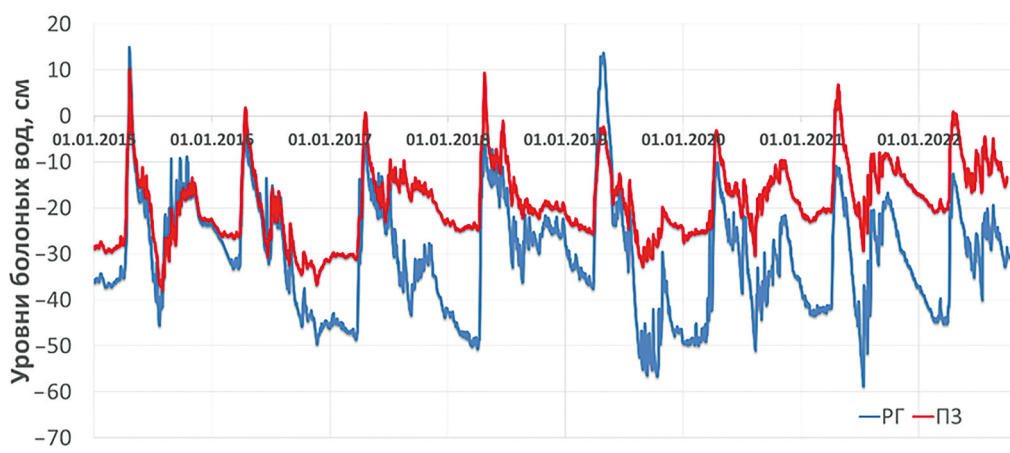


Рис. 3. Многолетняя динамика уровней вод осушенного (РГ) и естественного (ПЗ) участков Васюганского болота за 2015–2022 гг.

вень болотных вод на осушенном участке в среднем составил -31 см, а амплитуда колебаний — 75 см. В пределах его естественного участка вариация уровней менее значима и амплитуда колебания уровня равна 48 см, а средний уровень составил -19 см. Максимальный уровень болотных вод отмечен на обоих участках в 2015 г. и составил на осушенном участке 15 см, а на естественном участке 10 см. Минимальные отметки уровней -59 см отмечены на осушенном участке в 2021 г., тогда как на естественном участке минимальный уровень -38 см был отмечен в 2015 г. (рис. 3). Минимумы отмечались либо в период перед началом половодья (март-апрель), либо в летне-осеннюю межень (июль — сентябрь), за исключением 2016 г., когда минимум был отмечен в ноябре с последующим повышением в декабре в результате оттепели.

Снижение уровней начинается в октябре — декабре и продолжается до марта в связи с отсутствием атмосферного питания болота. При появлении снежного покрова и промерзании торфяной залежи болот испарение влаги с поверхности отсутствует, а изменение уровней болотных вод зимой происходит под влиянием фильтрационного стекания воды по деятельному слою. Зимой за 2015–2022 гг. в среднем на осушенном участке уровень равен -38 см, а на естественном участке составил -23 см. В середине апреля отмечается подъем уровней в результате снеготаяния, а в дальнейшем происходит их снижение, нарушаемое поступлением атмосферных осадков и незначительными подъемами уровней в летний, а затем и в осенний период. В весенний период за 2015–2022 гг. в среднем на осушенном участке уровни повышаются до -16 см, на естественном участке Васюганского болота до -9 см, а в летне-осенний период снижаются до -30 и -18 см соответственно.

Анализ кривых обеспеченности показал, что для осушенного участка (РГ) болота наибольшей частотой встречаемости (79%) характеризуются уровни в диапазоне от -50 до -20 см. Тогда как в пределах естественного участка (ПЗ) наиболее часто (в 78% случаев) отмечаются уровни в диапазоне от -30 до -10 см. Следует отметить, что для осушенного участка снижение активной пористости при увели-

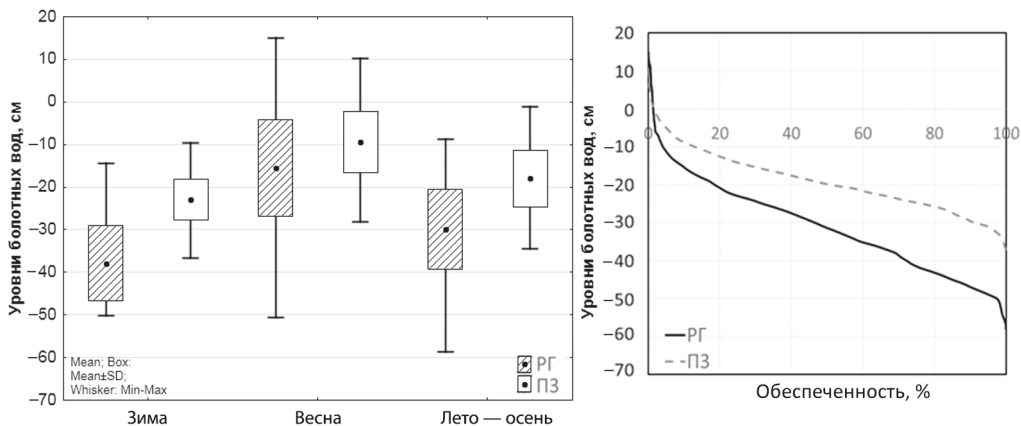


Рис. 4. Сезонные характеристики и кривые обеспеченности уровней болотных вод естественного и осушенного участков Васюганского болота за 2015–2022 гг.

чений степени разложения верхнего слоя торфяной залежи (Maloletko et al., 2018) приводит к повышению амплитуды колебания уровней.

Анализ пространственной вариации уровней болотных вод в среднем за 2022 г. показал, что отмечается более высокий уровень болотных вод в топи (–10 см) и соседнем с ней участке (ПГ3) сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (–18 см), снижение до –27...–41 см наблюдается в грядово-мочажинном комплексе (Д2) сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтах (ПГ, ПГ2) и на пирогенном участке (ПГ2) (Харанжевская, 2023). Анализ данных показал, что характер гидрологического режима зависит не только от вида болотного микроландшафта, характера осушения и выгорания поверхности, но и от расположения участка вблизи топей выклинивания (Иванов, 1953), осушительных каналов, грунтовых дорог, зон дренирования магистрального канала и водоприемника (рис. 4). Влияние пирогенного фактора способствовало повышению средних отметок уровней ближе к поверхности болота на участке ПГ2 за счет выгорания и выравнивания микрорельефа, а также привело к значительному увеличению амплитуды колебания уровней, в результате в периоды высокой водности уровни на пирогенном участке выше, а в меженные периоды уровни значительно снижаются за счет уменьшения вододерживающей способности торфяной залежи после пожара (рис. 5).

В химическом составе вод осушенного участка Васюганского болота отмечены более высокие концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ в сравнении с естественным участком (рис. 6). При этом в связи с зарастанием осушительных каналов отмечается процесс самовосстановления болота, в результате чего химический состав вод осушенного и естественного участков Васюганского болота в отдельные периоды имеет минимальные отличия (Харанжевская, 2022). Анализ многолетних изменений (за период с 2015 по 2022 г.) химического состава болотных вод показал сходную динамику содержания Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ и минерализации вод на осушенном (ПГ) и естественном (ПЗ) участках Васюганского болота, максимальные концентрации которых отмечены в 2015 г. Содержание остальных компонентов в водах естественного и осушенного участков болота имеет более сложную динамику, в том числе в связи с влиянием пожара в 2016 г. Так, в водах осушенного участка

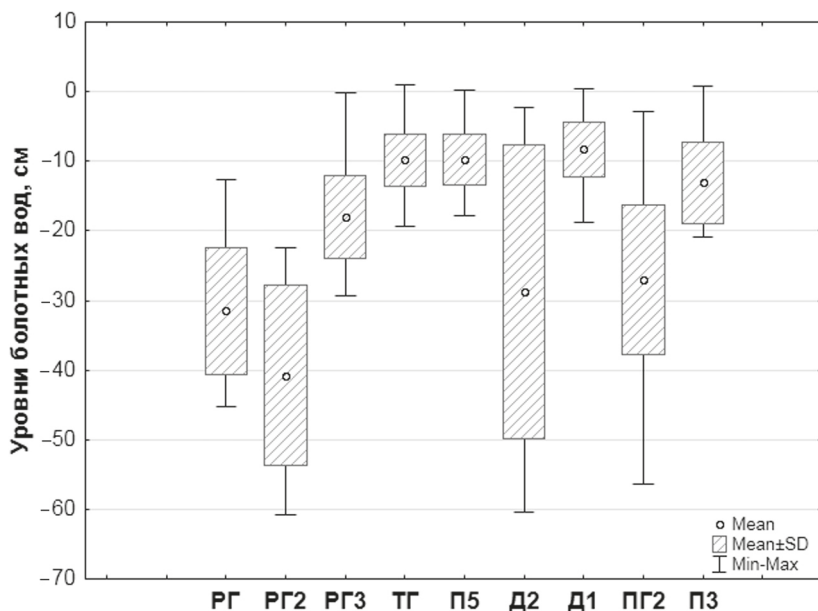


Рис. 5. Пространственные изменения характеристик уровня режима естественного (П3, П5, Д1) и осушенного (Р1, Р2, Р3, П2, Т1, Д2) участков Васюганского болота в 2022 г.

Васюганского болота в 2016–2017 гг. отмечается повышение величины рН и концентраций Na^+ , K^+ , NO_3^- , $\text{Fe}_{\text{общ}}$; в многоводный 2018 г. отмечается снижение содержания практически всех компонентов, за исключением NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NO_3^- . Предыдущие исследования (Харанжевская и др., 2019) показали, что влияние пожара на химический состав отмечается и за пределами пожарного контура, что связано с водной миграцией веществ в торфяной залежи и аэрозольным переносом веществ.

Анализ результатов химического анализа болотных вод за 2022 г. показал, что в пробах, отобранных в пределах сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтов осушенного участка Васюганского болота, отмечаются низкие рН и более высокие концентрации K^+ , Na^+ , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , NO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ и минерализации вод в сравнении с осоково-сфагновой топью и грядово-мочажинным комплексом, особенно выделяются пробы, отобранные в пределах РГ2 и РГ3 (Kharanzhevskaya, 2022). В 2022 г., на 6-й год после пожара, в водах пирогенного участка болота отмечаются повышенные концентрации K^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- .

В водах р. Гавриловки в среднем за 2015–2022 гг. наблюдается более низкая (в 1.3 раза) величина рН и концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- в сравнении с водами р. Ключ, которая дренирует естественный участок Васюганского болота, и, наоборот, в водах р. Гавриловки отмечаются повышенные концентрации NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , а также $\text{C}_{\text{орг}}$, что является индикатором влияния осушения и пирогенного фактора (рис. 7). Повышенные концентрации минеральных компонентов в водах р. Ключ, вероятно, объясняются меньшей заболоченностью водосбора (около 77 %) и выносом веществ с территории водосбора, занятой минеральными почвами. В многолетней динамике химического состава речных вод также

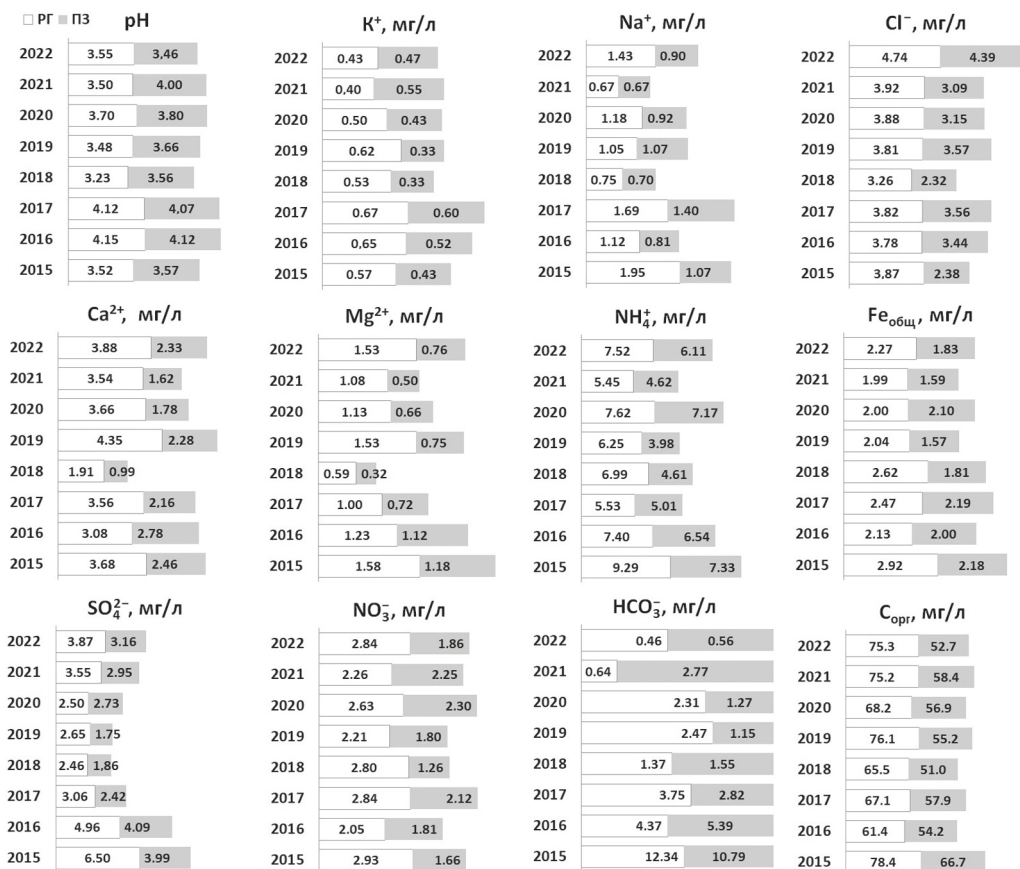


Рис. 6. Химический состав вод естественного (ПЗ) и осушенного (РГ) участков Васюганского болота за апрель — сентябрь 2015–2022 гг.

наблюдаются отличия. Многолетние изменения химического состава вод р. Гавриловки определяются как гидрометеорологическими условиями, так и влиянием осушения и пирогенным фактором. В 2017 г., на следующий год после пожара, в водах р. Гавриловки был отмечен рост концентраций K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Fe_{общ}$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , что согласуется с результатами, полученными ранее для болотных вод осушенного участка Васюганского болота (Kharanzhevskaya and Sinyutkina, 2021). В многоводный 2018 г. замечено резкое снижение концентраций химических веществ в водах. В последующие годы в связи с повышением температур воздуха в 2020 г. и дальнейшим разложением пирогенного слоя на выгоревшем участке бассейна в водах р. Гавриловки отмечается рост рН и увеличение в 1.2–3 раза содержания Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , а также $C_{орг}$.

Вынос минеральных веществ из бассейна р. Гавриловки в период весеннего половодья и летне-осенней межени в среднем за 2015–2022 гг. составил 711 т, а органических веществ — 468 т (рис. 8). Повышение объема стока минеральных веществ до 1108 т и органических веществ до 789 т было отмечено в 2015 и в 2019 гг. вследствие разложения пирогенного слоя. В 2022 г. суммарный вынос минеральных веществ из водосбора р. Гавриловки был минимальным и составил всего 414 т.

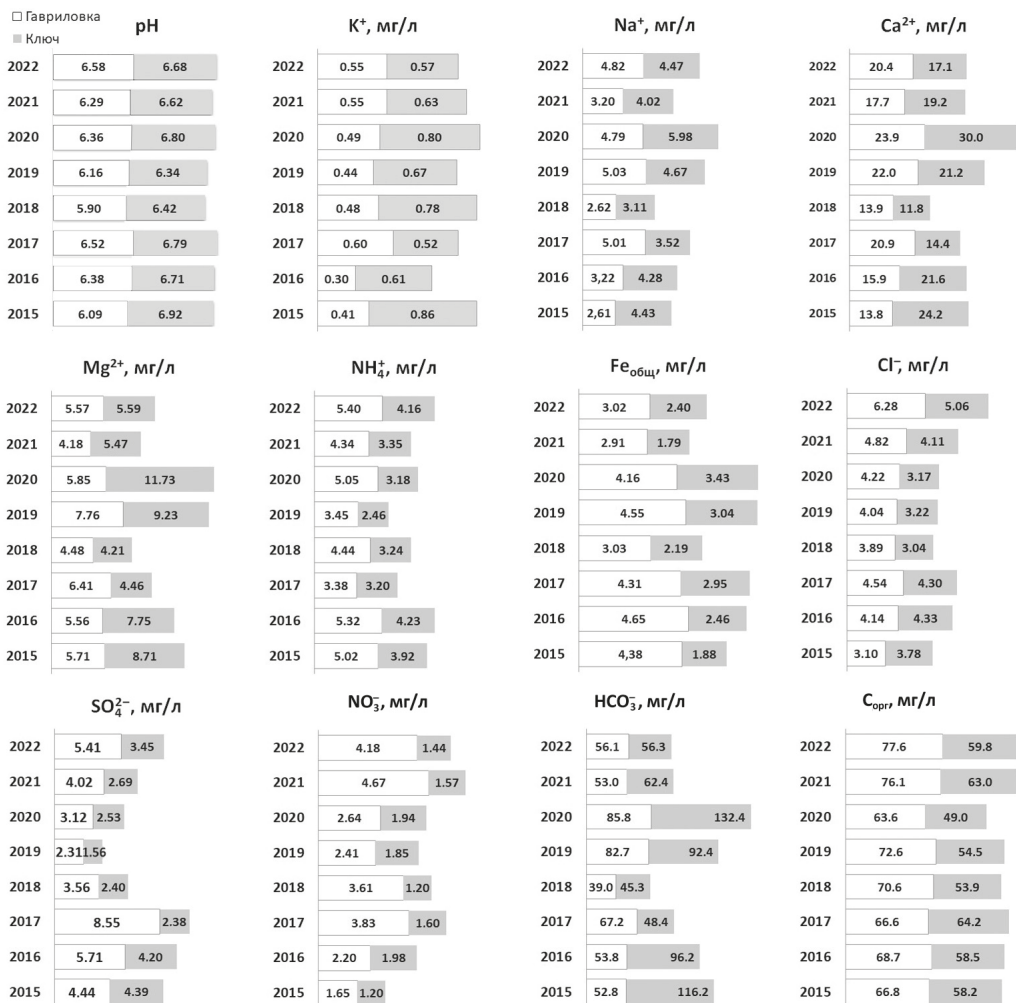


Рис. 7. Химический состав вод рек Гавриловки и Ключ за апрель — сентябрь 2015–2022 гг.

Проведенный факторный анализ методом главных компонент показал, что первая компонента наиболее значима и определяет 60% общей изменчивости в системе, отражает влияние атмосферных осадков на величину выноса веществ с осушенного участка Васюганского болота. Высокие факторные нагрузки имеет сумма атмосферных осадков за год (-0.37) и вынос ионов K⁺ (-0.89), Na⁺ (-0.77), Ca²⁺ (-0.92), Mg²⁺ (-0.95), NH₄⁺ (-0.88), Fe_{общ} (-0.94), Cl⁻ (-0.91), SO₄²⁻ (-0.60), NO₃⁻ (-0.43), HCO₃⁻ (-0.84), а также C_{орг} (-0.99). Вторая компонента чуть менее значима и определяет влияние термического фактора на вынос веществ с речными водами. Высокие факторные нагрузки имеет сумма активных температур (-0.71) и температура воздуха в дату отбора проб (-0.85), которые находятся в корреляционной зависимости с выносом с водами р. Гавриловки ионов HCO₃⁻ (-0.47), Na⁺ (-0.42), Ca²⁺ (-0.30), Mg²⁺ (-0.27), Fe_{общ} (-0.27) (рис. 9).

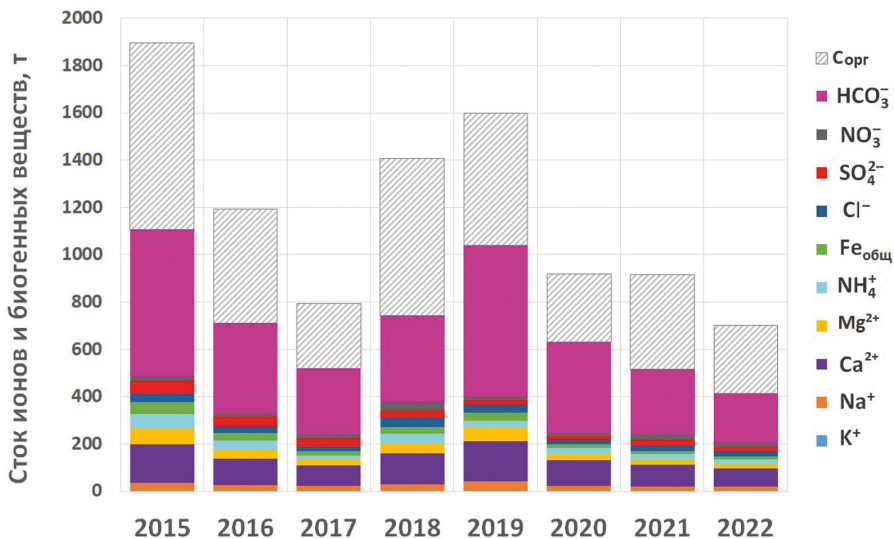


Рис. 8. Сток ионов и органических веществ за период весеннего половодья и летне-осенней межени р. Гавриловки в 2015–2022 гг.

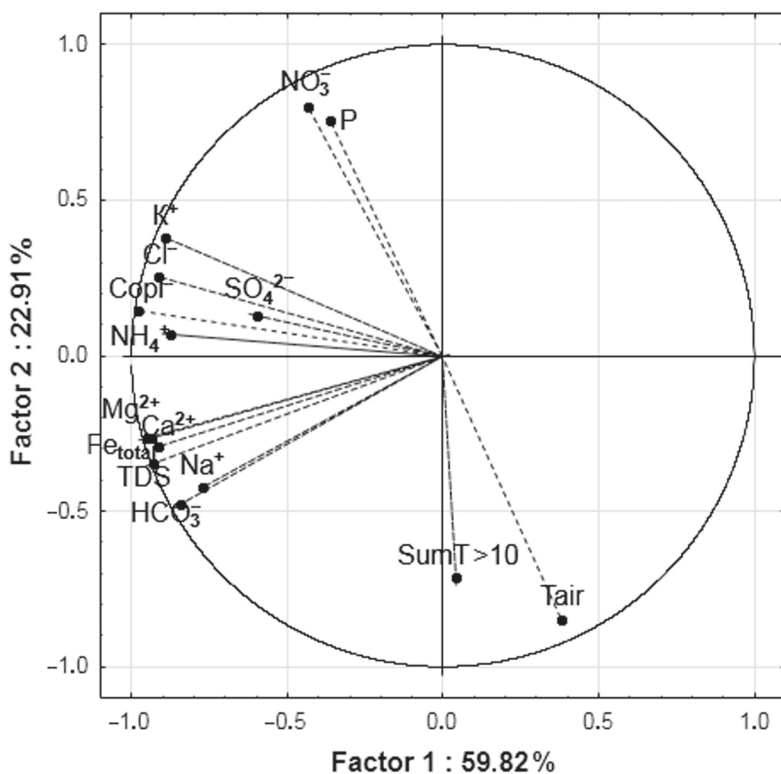


Рис. 9. Диаграмма факторного анализа выноса химических веществ с водами р. Гавриловки в 2015–2022 гг.: TDS — суммарный вынос ионов, т; DOC — вынос органического углерода, т; P — сумма атмосферных осадков за год, мм; Tair — температура воздуха, °C; SumT > 10 °C — сумма активных температур > 10 °C

4. Обсуждение результатов

Многочисленные исследования показывают, что осушение болот и их хозяйственное использование ведут к деградации экосистем: меняется химический состав болотных и речных вод, увеличивается вынос минеральных и органических веществ (Xu et al., 2021; Finér et al., 2021), изменяется гидрологический режим болота (Haapalehto et al., 2014). Анализ динамики уровней за 2015–2022 гг. показал, что на осушенном участке Васюганского болота отмечено снижение уровней до –31 см, что на 12 см ниже, чем в естественных условиях, при этом амплитуда колебаний уровней выше почти в 1.6 раза. В результате осушения отмечается значительное снижение уровней в зимний и летне-осенний периоды, минимальная величина составила –59 см, что на 21 см ниже, чем на естественном участке. В условиях изменения водно-физических свойств верхнего слоя торфяной залежи отмечается значительный подъем уровней в период снеготаяния и дождей, максимум равен 15 см выше поверхности болота, что на 5 см превышает максимальную величину для неосушенной части. В целом полученные закономерности уровня режима сопоставимы с данными, приведенными по Финляндии (Haapalehto et al., 2014) и Канаде (Bourgault et al., 2019). Однако следует отметить, что значительное влияние на гидрологический режим участка лесомелиорации Васюганского болота оказывает процесс зарастания и заболачивания осушительных каналов, в периоды высокой водности формируются зоны подпора, что приводит к повышению амплитуды колебания уровней. Пирогенный фактор также оказывает значительное влияние на гидрологический режим исследуемого участка Васюганского болота: в результате выгорания и выравнивания микрорельефа болота отмечаются повышение отметок уровней ближе к поверхности болота и значительное повышение амплитуды колебания уровней, значительное снижение уровней в меженный период за счет уменьшения водоудерживающей способности торфяной залежи.

По химическому составу болотных вод осушенный участок Васюганского болота характеризуется повышенными концентрациями Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ в сравнении с естественным участком. При этом химический состав вод в одинаковых микроландшафтах может существенно различаться по территории одного болотного массива и во многом зависит от расположения места отбора проб относительно путей фильтрации болотных вод и осушительных каналов. Зарастание осушительных каналов создает подпор вод выше по уклону поверхности и приводит к тому, что в микроландшафтах осушенного участка, расположенных вблизи этих каналов, в периоды высокой водности химический состав вод становится сходен с естественным участком Васюганского болота. В многолетней динамике следует выделить 2015 г., когда был отмечен резкий рост температуры воздуха в регионе (до 2 °С) и в болотных водах естественного и осушенного участков Васюганского болота наблюдались максимальные за исследуемый период концентрации Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , HCO_3^- , $\text{C}_{\text{орг}}$ и минерализации вод. В водах р. Гавриловки отмечались повышенные концентрации NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , а также $\text{C}_{\text{орг}}$ в сравнении с р. Ключ, которая дренирует естественный участок Васюганского болота.

Под влиянием пирогенного фактора, согласно предыдущим исследованиям (Kharanzhevskaya and Sinyutkina, 2021), в водах Васюганского болота, а также водах

р. Гавриловки отмечаются повышенные концентрации K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Fe_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- . Содержание химических веществ в болотных водах зависит от степени постпирогенной трансформации участка болота и положения уровня болотных вод: на участках с частичным выгоранием поверхности химический состав вод в первые годы после пожара был близок к природному фону, с одной стороны, а с другой — на них были отмечены максимально благоприятные условия для водной миграции веществ, накопленных в результате пожара 2016 г. Через год после пожара начался процесс восстановления болота, и в 2018–2019 гг. отмечалось снижение концентраций SO_4^{2-} , HCO_3^- и, наоборот, увеличение содержания K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , NH_4^+ , что связано с интенсификацией процессов разложения органических веществ в верхних выгоревших слоях торфяной залежи и закономерностями водной миграции. В дальнейшем анализ данных показал, что в 2020–2021 гг., на 4–5-й год после пожара, в химическом составе вод Васюганского болота сохраняются повышенные в 2–5 раз относительно фона концентрации ионов K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , в меньшей степени Ca^{2+} и Mg^{2+} , Na^+ , а в результате разложения выгоревших растительных остатков отмечается также повышение концентрации NO_3^- , но в целом наблюдается тенденция к снижению в болотных водах содержания веществ, связанных с пирогенным фактором. В итоге в 2022 г. превышение фоновых значений отмечено только по содержанию в болотных водах ионов K^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- . Между тем важно отметить пульсирующий характер изменения концентраций химических веществ после пожара в болотных и речных водах за исследуемый многолетний период. Полученные нами результаты в целом согласуются с ранее опубликованными данными по влиянию пирогенного фактора на химический состав вод. 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, углеводородов (Lydersen et al., 2014; Emmerton et al., 2020; Ахметьева и др., 2011; Украинцев, 2017). Наибольшие изменения химического состава вод отмечаются в первые годы после пожара, однако негативная ситуация может сохраняться в течение трех лет и более после пожара (Rust et al., 2018; Ахметьева и др., 2020; Sulwiński et al., 2020).

5. Заключение

Исследования показали, что проблема оценки современного состояния осушенных болот также актуальна и для Западной Сибири. Полученные результаты подтвердили, что под влиянием осушения происходит трансформация гидрологического режима болот, отмечается значительное снижение уровней болотных вод, увеличивается амплитуда их колебания. В связи с активизацией процессов разложения верхних слоев торфяной залежи при снижении уровней и, как следствие, пирогенного фактора, на осушенном участке Васюганского болота происходит изменение химического состава болотных вод и повышение концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Fe_{\text{общ}}$, Cl^- , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , $C_{\text{орг}}$. В речных водах также отмечается рост концентраций NH_4^+ , $Fe_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , а также $C_{\text{орг}}$. Исследования показали, что вынос химических веществ за период весеннего половодья и летне-осенней межени с осушенного участка Васюганского болота преобладал в 2015 г. на фоне роста температуры воздуха, а суммарный объем стока веществ составил 1896 т, из кото-

рых вынос $C_{орг}$ был равен 42 %, или 789 т, и в 2019 г., когда стартовал активный процесс разложения пирогенного слоя. Современные тенденции изменения климата влияют на состояние болот во всем мире и в Западной Сибири в частности. В настоящее время в пределах исследуемого осушенного участка Васюганского болота отмечаются процессы зарастания каналов и тенденции к восстановлению болота, что также оказывает значительное влияние на химический состав вод и гидрологический режим Васюганского болота. 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. При этом осушенные участки болот Западной Сибири могут являться своеобразными природными моделями для оценки влияния изменений климата на качество природных вод.

Литература

- Ахметьева, Н. П., Лапина, Е. Е., Михайлова, А. В. (2011). Изменение химического состава болотных вод после пожаров 2010 года (на примере водосбора Ивановского водохранилища). *Труды Инсторфа*, 4 (57), 12–16.
- Ахметьева, Н. П., Михайлова, А. В., Кричевец, Г. Н., Беляев, А. Ю. (2020). *Торфяные болота центральных областей европейской части России: их трансформация за последние 100 лет*. М.: ГЕОС.
- Батуев, В. И. и Калужный, И. Л. (2020). Анализ факторов, определяющих многолетнее изменение стока с олиготрофных болот. *Водное хозяйство*, 6, 28–46.
- Иванов, К. Е. (1953). *Гидрология болот*. Л.: Гидрометеиздат.
- Калужный, И. Л. (2018). Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России. *Метеорология и гидрология*, 8, 72–81.
- Лисс, О. Л., Абрамова, Л. И., Аветов, Н. А., Березина, Н. А., Инишева, Л. И., Курнишкова, Т. В., Слукка, З. А., Толпышева, Т. Ю., Шведчикова, Н. К. (2001). *Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение*. Тула: Гриф и К.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам* (1990). Л.: Гидрометеиздат. Вып. 8.
- Потапова, Т. М., Марков, М. Л., Задонская, О. В. (2020). Установление гидрохимического фона верхних болот различных регионов России для обоснования нормативов допустимого воздействия на болота. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (3), 455–467. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.303>
- Савичев, О. Г., Мазуров, А. К., Рудмин, М. А., Хвощевская, А. А., Даулетова, А. Б. (2018). Фоновые показатели эколого-геохимического состояния вод верхних болот в таежной зоне на территории Российской Федерации. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 329 (9), 101–116.
- Украинцев, А. В. (2017). *Особенности миграции химических элементов в снежном покрове и поверхностных водах в районах лесных пожаров Центральной Бурятии*. Дисс. ... канд. геол.-минер. наук. Улан-Удэ.
- Харанжевская, Ю. А. (2022). Анализ сезонной и многолетней динамики химического состава вод осушенного участка Васюганского болота. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 333 (8), 215–225. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3649>
- Харанжевская, Ю. А. (2023). Особенности уровня режима осушенного участка северо-восточных отрогов Васюганского болота. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 334 (12), 97–108.
- Харанжевская, Ю. А., Синюткина, А. А., Гашкова, Л. П. (2019). Интегральная оценка пирогенной нагрузки по содержанию Cu, Pb, Zn и Cd в компонентах Васюганского болота (Западная Сибирь). *Геосферные исследования*, 4, 62–73.
- Харюткина, Е. В., Логинов, С. В., Усова, Е. И., Мартынова, Ю. В., Пустовалов К. Н. (2019). Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX — начале XXI веков. *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2, 45–65.

- Berezin, A. E., Bazanov, V. A., Skugarev, A. A., Rybina, T. A., Parshina, N. V. (2014). Great Vasyugan Mire: Landscape structure and peat deposit structure features. *International Journal of Environmental Studies*, 71 (5), 618–623. <https://doi.org/10.1080/00207233.2014.942537>
- Bourgault, M.-A., Larocque, M., Garneau, M. (2019). How do hydrogeological setting and meteorological conditions influence water table depth and fluctuations in ombrotrophic peatlands? *Journal of Hydrology*, X, 00032. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100032>
- Emmerton, C. A., Cooke, C. A., Hustindss, S., Silins, U., Emelko, M. B., Lewis, T., Kruk, M. K., Taube, N., Zhu, D., Jackson, B., Stone, M., Kerr, J. G., Orwin, J. F. (2020). Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Research*, 116071. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116071>
- 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. (2021). Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. *Science of The Total Environment*, 762, 144098. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144098>
- Groisman, P. Ya. and Gutman, G., eds (2013). *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. (Environmental Science and Engineering.) Springer Nature.
- Haapalehto, T., Kotiaho, J. S., Matilainen, R., Tahvanainen, T. (2014). The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands. *Journal of Hydrology*, 519, 1493–1505. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.09.013
- Kharanzhevskaya, Yu. A. (2022). Effect of Drainage on Spatio-Temporal Variation in Water Chemistry of the Great Vasyugan Mire. *Geography and Natural Resources*, 43 (1), S36–S43. <https://doi.org/10.1134/S1875372822050110>
- Kharanzhevskaya, Yu. A. and Sinyutkina, A. A. (2021). 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*, 928, 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/928/1/012006>
- Kharuk, V. I., Ponomarev, E. I., Ivanova, G. A., Dvinskaya, M. L., Coogan, S. C., Flannigan, M. D. (2021). Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 50, 1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Kiselev, M. V., Voropay, N. N., Dyukarev, E. A., Kurakov, S. A., Kurakova, P. S., Makeev, E. A. (2018). Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 190, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/190/1/012031>
- Lydersen, E., Høgberget, R., Moreno, C. E., Garmo, Ø. A., Hagen, P. C. (2014). The effects of wildfire on the water chemistry of dilute, acidic lakes in southern Norway. *Biogeochemistry*, 119, 109–124. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9951-8>
- Maloletko, A. A., Sinyutkina, A. A., Gashkova, L. P., Kharanzhevskaya, Yu. A., Magur, M. G., Voistinova, E. S., Ivanova, E. S., Chudinovskaya, L. A., Khaustova, A. A. (2018). Effects of long-term drainage on vegetation, surface topography, hydrology and water chemistry of north-eastern part of Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211 (1), 012033. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/211/1/012033>
- Rust, A. J., Hogue, T. S., Saxe, S., McCray, J. (2018). Post-fire water-quality response in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 27 (3), 203–216. <https://doi.org/10.1071/wf17115>
- Savichev, O. G., Mazurov, A. K., Pipko, I. I., Sergienko, V. I., Semiletova, I. P. (2016). Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob River basin. *Doklady Earth Sciences*, 466 (1), 59–63. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16010141>
- Sinyutkina, A. A. (2021). Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics. *Catena*, 205, 105464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>
- Sinyutkina, A. A., Gashkova, L. P., Koronotova, 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. (2020). 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*, 408, 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012037>
- Sulwiński, M., Mętrak, M., Wilk, M., Suska-Malawska, M. (2020). 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*, 746, 141142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141142>

Xu, X., Lu, K., Wang, Z., Wang, M., Wang, S. (2021). Effects of drainage on dissolved organic carbon (DOC) characteristics of surface water from a mountain peatland. *Science of The Total Environment*, 789, 147848. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.1478>

Статья поступила в редакцию 16 августа 2023 г.

Статья рекомендована к печати 20 июня 2024 г.

Информация об авторе:

Харанжевская Юлия Александровна — <https://orcid.org/0000-0002-9945-0129>, kharan@yandex.ru

The effects of long-term drainage and wildfires on water table level and water chemistry of the Great Vasyugan Mire*

Yu. A. Kharanzhevskaya

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, 3, ul. Gagarina, Tomsk, 634050, Russian Federation

For citation: Kharanzhevskaya, Yu. A. (2024). The effects of long-term drainage and wildfires on water table level and water chemistry of the Great Vasyugan Mire. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (3), 453–471. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.304> (In Russian)

In this paper, we assessed long-term changes in water table level of the Great Vasyugan Mire, water chemistry and the removal of mineral and organic substances in the mire-river system in the taiga zone of Western Siberia under the conditions of forest reclamation, pyrogenic factor and climate change. In the drained area of the Great Vasyugan Mire, a significant decrease in water table levels and an increase in the amplitude of their fluctuations by 1.6 times were noted. The effect of the pyrogenic factor is expressed, on the contrary, in an increase in water table levels due to surface burnout. In the water of the drained part of the Great Vasyugan Mire, an increase in the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_{total} , Cl^- , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , DOC was noted. An increase in the content of NH_4^+ , Fe_{total} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , and DOC is observed in river waters. An indicator of the effect of the pyrogenic factor on the chemical composition is an increase in the pH value and the content of K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- ions, as well as Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_{total} . In connection with the overgrowth of the ditches, the process of self-healing of the mire is observed, and backwater zones are formed near the ditches and the amplitude of level fluctuations increases, as a result, the chemical composition of the waters of the drained and natural areas of the Great Vasyugan Mire in certain periods has minimal differences. Studies have shown that the removal of mineral and organic substances from the drained area of the great Vasyugan Mire prevailed in the high-water year 2018 and amounted to 2054 tons, of which the removal of DOC was equal to 47 % or 969 tons. In the future, climate change, an increase in air temperature and precipitation in the region are likely, will contribute to the removal of biogenic elements and organic substances from mires and increase their concentration in river waters.

Keywords: mire, river, drainage, pyrogenic factor, water chemistry, water table level, Western Siberia.

* This study was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-27-00242.

References

- Akhmeteva, N. P., Lapina, E. E., Mikhailova, A. V. (2011). Changes in the chemical composition of mire waters after the fires of 2010 (on the example of the watershed of the Ivankovsky reservoir). *Proceedings of Instorf*, 4 (57), 12–16. (In Russian)
- Akhmeteva, N. P., Mikhailova, A. V., Krichevets, G. N., Belyaev, A. Yu. (2020). *Peatlands in the central regions of the European part of Russia: their transformation over the past 100 years*. Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Batuev, V. I. and Kalyuzhny, I. L. (2020). Analysis of factors determining long-term changes in runoff from oligotrophic bogs. *Water resources*, 6, 28–46. (In Russian)
- Berezin, A. E., Bazanov, V. A., Skugarev, A. A., Rybina, T. A., Parshina, N. V. (2014). Great Vasyugan Mire: Landscape structure and peat deposit structure features. *International Journal of Environmental Studies*, 71 (5), 618–623. <https://doi.org/10.1080/00207233.2014.942537> (In Russian)
- Bourgault, M.-A., Larocque, M., Garneau, M. (2019). How do hydrogeological setting and meteorological conditions influence water table depth and fluctuations in ombrotrophic peatlands? *Journal of Hydrology*, X, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100032>
- Emmerton, C. A., Cooke, C. A., Hustindss, S., Silins, U., Emelko, M. B., Lewis, T., Kruk, M. K., Taube, N., Zhu, D., Jackson, B., Stone, M., Kerr, J. G., Orwin, J. F. (2020). Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Research*, 116071. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116071>
- 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. (2021). Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. *Science of the Total Environment*, 762, 144098. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144098>
- Groisman, P. Ya. and Gutman, G., eds (2013). *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. (Environmental Science and Engineering.) Springer Nature.
- Haapalehto, T., Kotiaho, J. S., Matilainen, R., Tahvanainen, T. (2014). The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands. *Journal of Hydrology*, 519, 1493–1505. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.013>
- Instructions for hydrometeorological stations and posts* (1990). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., vol. 8. (In Russian)
- Ivanov, K. E. (1953). *Hydrology of mires*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Kalyuzhny, I. L. (2018). General features of the formation of the hydrochemical regime of the main types of mires in Russia. *Meteorology and hydrology*, 8, 72–81. (In Russian)
- Kharanzhevskaya, Yu. A. (2022). Effect of Drainage on Spatio-Temporal Variation in Water Chemistry of the Great Vasyugan Mire. *Geography and Natural Resources*, 43 (1), S36–S43. <https://doi.org/10.1134/S1875372822050110>
- Kharanzhevskaya, Yu. A. (2022). Seasonal and long-term dynamics of water chemistry within the drained part of the great Vasyugan mire. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333 (8), 215–225. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3649> (In Russian)
- Kharanzhevskaya, Yu. A. (2023). Water table dynamics in the drained part of the Great Vasyugan Mire. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 334 (12), 97–108. (In Russian)
- Kharanzhevskaya, Yu. A. and Sinyutkina, A. A. (2021). 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*, 928, 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/928/1/012006>
- Kharanzhevskaya, Yu. A., Sinyutkina, A. A., Gashkova, L. P. (2019). 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*, 4, 62–73. (In Russian)
- Kharuk, V. I., Ponomarev, E. I., Ivanova, G. A., Dvinskaya, M. L., Coogan, S. C., Flannigan, M. D. (2021). Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 50, 1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Kharyutkina, E. V., Loginov, S. V., Usova, E. I., Martynova, Yu. V., Pustovalov, K. N. (2019). Tendencies in changes of climate extremality in Western Siberia at the end of the XX century and the beginning of the XXI century. *Fundamental and Applied Climatology*, 2, 45–65. (In Russian)

- Kiselev, M. V., Voropay, N. N., Dyukarev, E. A., Kurakov, S. A., Kurakova, P. S., Makeev, E. A. (2018). Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 190, 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/190/1/012031>
- Liss, O. L., Abramova, L. I., Avetov, N. A., Berezina, N. A., Inisheva, L. I., Kurnishkova, T. V., Sluka, Z. A., Tolpysheva, T. Yu., Shvedchikova, N. K. (2001). *Peatlands of Western Siberia and their conservation value*. Tula: Grif i K Publ. (In Russian)
- Lydersen, E., Høgberget, R., Moreno, C. E., Garmo, Ø. A., Hagen, P. C. (2014). The effects of wildfire on the water chemistry of dilute, acidic lakes in southern Norway. *Biogeochemistry*, 119, 109–124. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9951-8>
- Maloletko, A. A., Sinyutkina, A. A., Gashkova, L. P., Kharanzhevskaya, Yu. A., Magur, M. G., Voistinova, E. S., Ivanova, E. S., Chudinovskaya, L. A., Khaustova, A. A. (2018). Effects of long-term drainage on vegetation, surface topography, hydrology and water chemistry of north-eastern part of Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211 (1), 012033. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/211/1/012033>
- Potapova, T. M., Markov, M. L., Zadonskaya, O. V. (2020) Establishment of the hydrochemical background of raised bogs in various regions of Russia to justify the standards for permissible impact on bogs. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (3), 455–467. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.303> (In Russian)
- Rust, A. J., Hogue, T. S., Saxe, S., McCray, J. (2018). Post-fire water-quality response in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 27 (3), 203–216. <https://doi.org/10.1071/wf17115>
- Savichev, O. G., Mazurov, A. K., Pipko, I. I., Sergienko, V. I., Semiletova, I. P. (2016). Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob River basin. *Doklady Earth Sciences*, 466 (1), 59–63. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16010141>
- Savichev, O. G., Mazurov, A. K., Rudmin, M. A., Khvashchevskaya, A. A., Dauletova, A. B. (2018). 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*, 329 (9), 101–116. (In Russian)
- Sinyutkina, A. A. (2021). Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the south-eastern part of Western Siberia: Peat accumulation and vegetation dynamics. *Catena*, 205, 105464. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105464>
- 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. (2020). 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*, 408, 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012037>
- Sulwiński, M., Mętrak, M., Wilk, M., Suska-Malawska, M. (2020). 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*, 746, 141142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141142>
- Ukraintsev, A. V. (2017). *Features of the migration of chemical elements in the snow cover and surface waters in the areas of forest fires in Central Buryatia*. PhD thesis. Ulan-Ude. (In Russian)
- Xu, X., Lu, K., Wang, Z., Wang, M., Wang, S. (2021). Effects of drainage on dissolved organic carbon (DOC) characteristics of surface water from a mountain peatland. *Science of The Total Environment*, 789, 147848. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147848>

Received: August 16, 2023

Accepted: June 20, 2024

Author's information:

Yulia A. Kharanzhevskaya — <https://doi.org/0000-0002-9945-0129>, kharan@yandex.ru