

УДК 556.561
DOI: 10.18799/24131830/2025/11/4928
Шифр специальности ВАК: 1.6.16
Научная статья



Особенности химического состава вод и торфа на периферии Васюганского болота как показатель водообмена на границе лес–болото

Ю.А. Харанжевская^{1,2✉}, А.А. Синюткина¹, М.Е. Кириллова¹

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

² Томский государственный университет, Россия, г. Томск

✉ kharan@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется важностью изучения водообмена на границах крупных болотных массивов Западной Сибири для прогноза процессов заболачивания территории и миграции веществ в условиях изменения климата. *Цель:* оценить вариацию химического состава вод и торфа в заболоченном лесу на периферии Васюганского болота как показатель тенденций изменения водообмена и миграции веществ на границе лес–болото в условиях изменения климата. *Объекты:* северо-восточный участок Васюганского болота в районе с. Полынянка Бакчарского района Томской области. *Методы.* Лабораторное изучение химического состава болотных вод и торфа проводилось методами титриметрии, спектрофотометрии, пламенной фотометрии в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН. Статистический анализ данных проводился с применением кластерного анализа и метода главных компонент. *Результаты.* Анализ данных показал повышение концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в химическом составе вод в заболоченном лесу, что свидетельствует об активности процессов заболачивания на границах Васюганского болота с участием грунтовых вод и снижении влияния атмосферных вод, сбрасываемых с болотного массива. В верхних слоях торфяной залежи на ключевых участках в заболоченном лесу отмечается повышение содержания K_2O , MgO , N-NH_4^+ и N-NO_3^- , что связано с процессами разложения растительных остатков и их минерализацией в условиях периодического обсыхания при снижении уровня воды. Как следствие в водах в заболоченном лесу отмечается высокое содержание органических веществ, что приводит к росту концентраций $C_{\text{орг}}$ в речных водах. Исследования показали, что зона контакта лес–болото и заболоченный лес, примыкающий к исследуемому участку Васюганского болота, вносит существенный вклад в общий объем выноса $C_{\text{орг}}$ с исследуемой территории, что важно учитывать в общем балансе углерода.

Ключевые слова: болотные воды, торф, химический состав, заболоченный лес, водообмен, Васюганское болото, Западная Сибирь

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиала Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (№ FNUU-2021-0004), финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А., Кириллова М.Е. Особенности химического состава вод и торфа на периферии Васюганского болота как показатель водообмена на границе лес–болото // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 11. – С. 161–172. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/4928



Water and peat chemistry variation on the periphery of the Great Vasyugan Mire as an indicator of water exchange at the forest–mire border

Yu.A. Kharanzhevskaya^{1,2}✉, A.A. Sinyutkina¹, M.E. Kirillova¹

¹ Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Tomsk, Russian Federation
² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

✉ kharan@yandex.ru

Abstract. Relevance. Importance of studying water exchange at the boundaries of large mire complex in Western Siberia to predict mire formation of the territory and migration of substances in the conditions of climate change. **Aim.** To assess variation in water and peat chemical composition in the Great Vasyugan Mire marginal area as an indicator of water exchange trends, mineral and organic substances release in climate change conditions. **Objects.** Northeastern part of the Great Vasyugan Mire close to Polynyanka village, Bakchar district, Tomsk region. **Methods.** Laboratory analysis of the water chemical composition was carried out by titrimetry, spectrophotometry, and flame photometry at the Laboratory and Analytical Center of the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat. Statistical analysis of the data was carried out using cluster analysis and principal component analysis. **Results.** Studies showed an increase in the concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , Fe_{total} in water at the swamp forest area, which indicates the activity of mire formation at the boundaries of the Great Vasyugan Mire with the participation of groundwater and decrease in atmospheric water impact. In the upper layers of the peat deposit in key areas in the swamp forest, an increase in the content of K_2O , MgO , N-NH_4^+ и N-NO_3^- is noted. This is associated with decomposition of plant residues and their mineralization in dry conditions. As a result, high content dissolved organic carbon is noted in the waters at swamp forest area, which leads to an increase in concentration in river waters. Studies shown that the forest–swamp contact zone of the Great Vasyugan Mire makes a significant contribution to the total volume of dissolved organic carbon removal from the studied area, which is important to take into account in carbon balance calculation.

Keywords: mire waters, peat, chemical composition, swamp forest, water exchange, Great Vasyugan Mire, Western Siberia

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the State task of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Agriculture and Peat (no. FNUU-2021-0004) funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A., Kirillova M.E. Water and peat chemistry variation on the periphery of the Great Vasyugan Mire as an indicator of water exchange at the forest–mire border. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 11, pp. 161–172. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/4928

Введение

Важной особенностью заболоченных лесов на периферии крупных болотных массивов Западной Сибири является их повышенная чувствительность к изменениям окружающей среды и климата, а их состояние может служить индикатором протекающих природных процессов [1–4]. В регионе отмечается рост температуры воздуха, увеличение количества атмосферных осадков, смена режима их выпадения, которая выражается в повышении частоты экстремальных ливневых осадков в летне-осенний период [5]. Увеличение количества атмосферных осадков в летне-осенний период способствует трансформации гидрологического режима территорий, что, вероятно, будет способствовать изменению водообмена в

заболоченных лесах в зонах влияния крупных болотных массивов. Процессы водообмена в болотных ландшафтах широко изучались в [6], где указывалось, что в Западной Сибири в основном происходит расширение площади болот, при этом скорость их распространения неравномерна во времени. Во влажные периоды при повышенных осадках теплого периода года заболачиванию могут быть подвержены обширные площади по периферии болота благодаря длительному подъему кривых депрессий грунтовых вод [6].

В условиях резкой смены коэффициентов фильтрации на границе болота происходит застой вод, что способствует удержанию влаги в болоте и дальнейшему вертикальному торфонакоплению [7].

Рельеф поверхности в заболоченных лесах является важным фактором, определяющим направление водных потоков, что влияет на химический состав вод переходных зон, содержание питательных веществ в почвах и их доступность, а следовательно, и на характеристики растительности и процесс заболачивания [8–12]. Согласно данным [10] процесс заболачивания имеет пульсационный характер.

Проведенные ранее исследования [12, 13] показали, что процесс заболачивания на границах Васюганского болота продолжается и связан в первую очередь с подтоплением территории за счет сброса атмосферных вод с болотного массива и выполаживания рельефа в процессе накопления торфа. Однако последующие исследования и расчеты вегетационных индексов NDVI, VARI, WRI с использованием космоснимков Landsat и Sentinel за период 1999–2023 гг. показали, что за последние пять лет в заболоченном лесу отмечается тенденция к обсыханию. В целом данные, которые характеризуют этот процесс, весьма ограничены. При этом изучение химического состава вод в зонах современного заболачивания является весьма актуальным в связи ведущей ролью болот в формировании состава речных вод данной территории, которая является водосборным бассейном Арктических морей. Значительные колебания уровней воды в заболоченных лесах и периодическое их обсыхание может приводить к минерализации торфяной залежи и росту выноса органических и минеральных веществ, поступлению их в речные воды [14–16].

Следует отметить, что химический состав болотных вод таежной зоны Западной Сибири рассмотрен в целом ряде работ [17–21], изучены закономерности гидрохимического режима болот [19, 20], выполнена оценка процессов взаимодействия болотных вод с подземными водами [21] и влияния болотных вод на химический состав речных вод, однако роль заболоченных лесов в этих процессах практически не изучена, хотя процессы заболачивания территории оказывают значительное влияние на химический состав речных и подземных вод. Поэтому целью работы является оценка вариации химического состава вод в заболоченном лесу на периферии Васюганского болота как показателя тенденций изменения водообмена и миграции веществ на границе лес–болото в условиях изменения климата.

Объекты и методика исследования

Исследования проводились на небольшом ключевом участке на периферии северо-восточных отрогов Васюганского болота (Бакчарское болото, Стационар «Васюганский», с. Полынянка, Томская область) (рис. 1, табл. 1).

Исследования в 2022 г. включали отбор проб болотных вод и торфа. Отбор проб природных вод проводился одновременно 19–21 июля 2022 г. по

профилю, который включал в себя участки Васюганского болота с сосново-кустарничково-сфагновым болотным микроландшафтом с высокой и низкой сосной, заболоченный лес и русло водоприемника – малой реки Ключ (площадь водосбора 76,7 км²).

Отбор проб торфа на химический анализ и определение физико-технических свойств проводились на ключевом участке в заболоченном лесу. Отбор образцов торфа для определения физико-технических свойств производился с шагом 10 см по всей глубине торфяной залежи в пластиковые контейнеры для исключения нарушения структуры образца. Отбор проб торфа на химический анализ проводился также по слоям 10 см с помощью торфяного бура в полиэтиленовые пакеты. Лабораторное определение физико-технических свойств торфа проведено в соответствии с ГОСТ 11306-2013 (определение влажности торфа), ГОСТ 11306-2013 (определение зольности торфа), ГОСТ 28245-89 (определение степени разложения и ботанического состава торфа). Плотность определялась по соотношению массы образца к его объему. Объем образца определялся при замораживании исходных образцов ненарушенной структуры. Степень гумификации торфа определена с применением методики [22].

Определение химического состава вод проводилось в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиале Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН с применением аттестованных методик (табл. 2). В торфе проводилось определение обменных CaO и MgO (ГОСТ 27894.10-88), подвижных форм железа (ГОСТ 27894.7-88), P₂O₅ (ГОСТ 27894.5-88), K₂O (ГОСТ 27894.6-88), N-NH₄⁺ (ГОСТ 27894.3-88) и N-NO₃⁻ (ГОСТ 27894.4-88), а также массовой доли органического углерода по Тюрину с фотометрическим окончанием в модификации СибНИИСХиТ. Определение N-NO₃⁻ согласно ГОСТ 27894.4-88 проводилось в водной вытяжке из торфа. Для определения CaO и MgO, подвижных форм железа, P₂O₅, K₂O, N-NH₄⁺ использовалась солевая вытяжка из торфа (HCl), перед анализом пробы фильтровались через фильтр «синяя лента».

Точка П2 расположена в пределах сосновокустарничково-сфагнового микроландшафта с высокой сосной. Древесный ярус исследуемого участка болота образован сосной *Pinus sylvestris*, березой *Betula pubescence*. Травяно-кустарничковый ярус состоит из багульника *Ledum palustre*, кассандры *Chamaedaphne calyculata*, пушицы *Eriophorum vaginatum*, морошки *Rubus chamaemorus*. Моховой ярус состоит из сфагновых мхов с преобладанием *Sphagnum angustifolium*. Мощность торфяной залежи составляет 1 м.

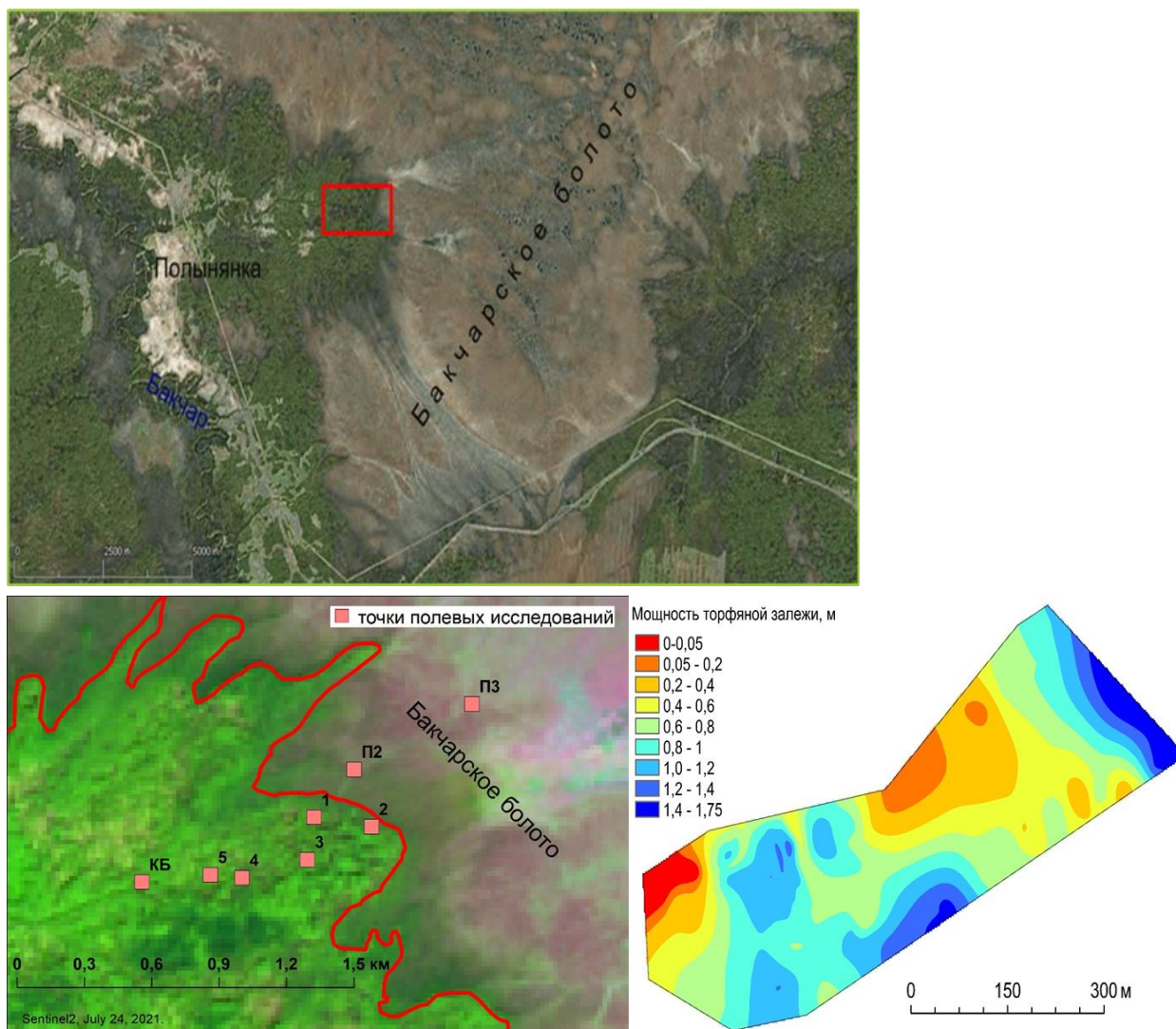


Рис. 1. Схема расположения точек полевых исследований
Fig. 1. Location map of field research sites

Точка ПЗ расположена в пределах сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта с низкой сосной. Древесный ярус исследуемого участка болота образован сосной *Pinus sylvestris* (проективное покрытие 40 %), травяно-кустарничковый ярус – *Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Andromeda polifolia*, *Eriophorum vaginatum*, *Rubus chamaemorus*. Моховой ярус состоит из сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum* 80 %, *Sphagnum divinum* 10 %, *Sphagnum angustifolium* 10 %). Мощность торфяной залежи составляет 3 м.

Точка № 1 (П1) расположена в пределах кедрово-березового разнотравного леса на расстоянии 120 м от границы Васюганского болота. Торфяная залежь отсутствует. Средняя высота древесного яруса составляет 17 м, сомкнутость крон 70 %. В травяном ярусе с проективным покрытием 70 % преобладают вейник (*Calamagrostis langsdorffii*), лабазник (*Filipendula ulmaria*).

Точка № 2 (П172) расположена в пределах кедрово-сосново-березового болотнотравного заболоченного леса на расстоянии 50 м от границы Васюганского болота. Торфяная залежь отсутствует. Средняя высота древесного яруса 14,5 м, сомкнутость крон 40 %. Проективное покрытие травяного яруса 80 %, ярус образован белокрыльником (*Calla palustris*), вахтой (*Menyanthes trifoliata*), вейником (*Calamagrostis langsdorffii*), осокой (*Carex elongata*).

Точка № 3 (П162) расположена в пределах кедрово-березового разнотравного заболоченного леса на расстоянии 350 м от границы Васюганского болота. Мощность торфяной залежи составляет 1,3 м. Средняя высота древесного яруса 15,5 м, сомкнутость крон 60 %. В травяном ярусе с проективным покрытием 80 % преобладают вейник (*Calamagrostis langsdorffii*), белокрыльник (*Calla palustris*).

Таблица 1. Характеристика ключевых участков в пределах Васюганского болота и пунктов отбора проб

Table 1. Key sites in the Great Vasyugan Mire margin area

Участок Site	Координаты Coordinates	Уровни болотных вод, см Water table level, cm
П2/Р2	56°58'15,3" 82°36'09,7"	-24
П3/Р3	56°58'24,3" 82°36'41,2"	-8
П1/Р1	56°58'8,278" 82°35'58,286"	-13
Л172/Л172	56°58'6,644" 82°36'13,634"	-22
Л162/Л162	56°58'2,96" 82°35'56,554"	-6
Л3/Л3	56°58'0,507" 82°35'39,527"	-11
Л1/Л1	56°58'0,832" 82°35'30,14"	-30
р. Ключ (КБ, исток в заболоченном лесу) Klyuch River (KB, river headwater in a swamp forest)	56°58'00,73" 82°35'13,62"	-
р. Ключ (КВ, среднее течение) Klyuch River (KV, middle course)	56°57'48,3" 82°33'17,1"	-
р. Ключ у с. Польшнянка (КН, нижнее течение) Klyuch River (KN, lower reaches of the river)	56°57'49,1" 82°31'15,4"	-

Точка № 4 (Л3) расположена в пределах кедрово-сосново-березового осоково-злакового заболоченного леса в 550 м от границы Васюганского болота. УБВ составил (-11 см). Средняя высота древесного яруса составила 18,5 м, сомкнутость крон – 40 %, мощность торфяной залежи равна 0,8 м. Проективное покрытие травяного яруса составляет 60 %. Ярус образован вейником (*Calamagrostis langsdorffii*) и осоками.

Точка № 5 (Л1) расположена в пределах елово-кедрово-березового разнотравного заболоченного леса на расстоянии 650 м от границы Васюганского болота. Мощность торфяной залежи составляет 20 см. Средняя высота древесного яруса 16 м, сомкнутость крон 50 %. Травяной ярус с проективным покрытием 80 % образован вейниками (*Calamagrostis neglecta*, *C. langsdorffii*), сабельником (*Comarum palustre*), хвощем (*Equisetum sylvaticum*), осоками и др.

Торфяная залежь в пределах точек отбора однородна по глубине и сложена древесным торфом с высокой степенью разложения (40–50 %). Средние значения влажности точек составляют 85,7; 84,2 и 83,1 % соответственно. Точки № 1 и 2 характеризуются схожим распределением значений зольности по глубине. Верхняя часть торфяной залежи до глубины 40–50 см характеризуется высокими значениями зольности (12–13 %), глубже происходит снижение зольности в среднем до 9–10 % в средней части торфяной залежи. В придонном слое отмече-

но увеличение зольности до 33 % на точке № 1 и до 20 % на точке № 2. Среднее значение зольности на точке № 3 составило 23 %. Среднее значение объемной плотности составляет 0,180 г/см³ и незначительно отличается как между точками, так и по глубине. Сравнение показателей с использованием теста Манна–Уитни ($p > 0,05$) не выявила достоверных различий в значениях влажности, зольности и плотности органического вещества между точками.

Таблица 2. Описание методов определения химического состава болотных вод

Table 2. 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)
ХПК/COD	Титриметрия/Titrimetry

Результаты и обсуждение

Содержание Ca²⁺ в водах исследуемых участков варьирует в значительных пределах. В водах, отобранных в высоком ряме (П2) и в заболоченном лесу на приграничных участках к болоту (П1, Л172), концентрация Ca²⁺ составила 8,82 мг/л, тогда как в водах, отобранных на участках, расположенных по профилю дальше от болота (Л162, Л3, Л1), содержание увеличилось до 38,1 мг/л. В целом столь значимое увеличение концентрации Ca²⁺ в водах свидетельствует о выклинивании грунтовых вод в этой зоне. В водах пограничных участков болота при этом сохраняется кислая реакция среды (рН=3,67), тогда как во всех пробах, отобранных в заболоченном лесу, величина рН изменяется от 5,56 до 6,48 и увеличивается до 7,72 в нижнем течении р. Ключ. В сравнении с болотными водами (низкий рям, 3,49 мг/л) концентрация Ca²⁺ в водах в зоне выклинивания грунтовых вод увеличилась в 11 раз. Содержание Ca²⁺ в водах р. Ключ (13,1 мг/л)

в заболоченном лесу ниже и незначительно повышается в нижнем течении, занимает промежуточное положение среди отобранных проб, что свидетельствует о смешении вод в зоне формирования руслового стока (рис. 2).

Концентрации Mg^{2+} также увеличиваются по профилю от болота до пунктов зоны выклинивания подземных вод (Л162, Л3, Л1). Сопоставляя данные по пробам, отобранным на болоте (П2, П3), можно отметить увеличение концентрации Mg^{2+} уже на приграничных участках примерно в 2 раза (3,54 мг/л). А в зоне выклинивания концентрации увеличиваются до 9,37 мг/л с максимумом 12,9 мг/л в точке Л3. Содержание Mg^{2+} в водах р. Ключ в заболоченном лесу близко к концентрациям, отмеченным в переходной зоне, и составило 5,20 мг/л. В нижнем течении реки концентрации Mg^{2+} в водах повышаются до 5,95 мг/л.

Содержание ионов Na^+ в водах исследуемых участков в целом повторяет динамику Ca^{2+} . Кон-

центрации Na^+ в водах в целом увеличиваются в ряду от низкого и высокого ряма (1 мг/л) к приграничным участкам (П1 и Л172) в среднем в 2 раза. И уже в зоне выклинивания грунтовых вод в заболоченном лесу концентрация Na^+ в водах возрастает в 10 раз в сравнении с болотом. Отмечается некоторое снижение содержания Na^+ в водах участка Л3, что согласуется с динамикой Ca^{2+} в этой зоне. Содержание Na^+ в водах р. Ключ резко снижается и приближается к концентрациям в болотных водах, повышаясь до 3,60 мг/л в нижнем течении. Пространственная вариация концентраций ионов K^+ в водах имеет весьма неоднозначную тенденцию с резким ростом на приграничном к болоту участке (2,80 мг/л). В остальных пунктах отбора проб содержание K^+ в водах сопоставимо (в среднем около 0,50 мг/л) с небольшим повышением в зоне выклинивания подземных вод (Л1). Содержание K^+ в водах р. Ключ весьма близко к его концентрациям в болотных водах.

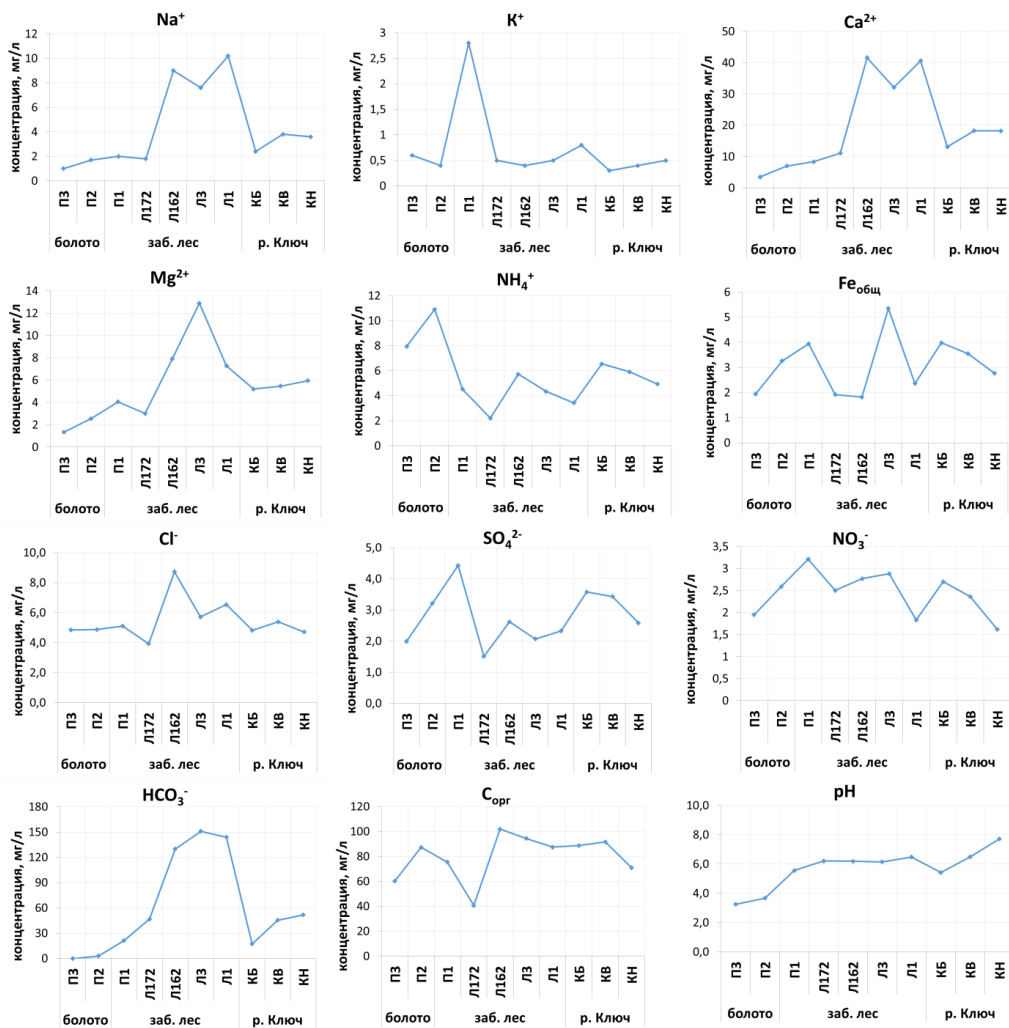


Рис. 2. Пространственная вариация химического состава вод по профилю Васюганское болото – заболоченный лес – река Ключ в 2022 г.

Fig. 2. Spatial variation in water chemistry along the Great Vasyugan Mire – swamp forest – Klyuch River profile in 2022

Содержание NH_4^+ в водах исследуемых участков имеет альтернативную пространственную динамику. Максимальные концентрации ионов NH_4^+ отмечены в пробах, отобранных на болоте (9,42 мг/л). При продвижении по профилю в сторону заболоченного леса концентрации NH_4^+ в водах снижаются, и минимум отмечается на приграничном к болоту участке леса без торфяной залежи Л172 (2,20 мг/л). В остальных пробах в заболоченном лесу концентрации сопоставимы и в среднем составляют 4,50 мг/л. В истоках реки Ключ отмечается рост концентраций NH_4^+ в водах до 6,54 мг/л, что определяется вкладом участков с торфяной залежью в заболоченном лесу в общий сток органических веществ. В нижнем течении р. Ключ концентрации NH_4^+ в водах снижаются.

Содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ имеет более сложную динамику, которая определяется величиной Eh, концентрациями кислорода в воде и коррелирует с содержанием NO_3^- в водах, что свидетельствует о миграции железа в процессе разложения органических остатков. Так, более низкие концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (в среднем 2,03 мг/л) отмечаются в водах низкого яма, в пробах в заболоченном лесу на приграничном участке (Л172), а также на ключевых участках Л162 и Л1. Тогда как в водах высокого яма, участка П1, а также в водах р. Ключ концентрации увеличиваются в 1,5 раза, а максимум 5,35 мг/л отмечается в зоне выклинивания грунтовых вод (Л3). Концентрации $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в водах р. Ключ закономерно снижаются от истока к нижнему течению.

Содержание Cl^- сопоставимо в пробах, отобранных на болоте и на приграничном участке болотолес и в среднем составило 4,69 мг/л. Близкие концентрации Cl^- в водах также отмечены в реке Ключ. Тогда как в зоне выклинивания грунтовых вод концентрации увеличиваются до 5,72–8,73 мг/л. В целом пространственная динамика Cl^- в водах исследуемых участков согласуется с вариацией Na^+ , что является индикатором более богатого состава подземных вод. В водах реки Ключ концентрации Cl^- сопоставимы с содержанием иона в болотных водах.

Пространственная вариация концентраций SO_4^{2-} в водах исследуемых участков в целом близка к динамике ионов NH_4^+ и коррелирует также с NO_3^- . Повышение концентраций отмечается в пробах, отобранных в высоком яме, соседнем с ним приграничном участке заболоченного леса (П1) и в водах р. Ключ, в среднем до 3,82 мг/л. Тогда как в водах остальных участков концентрации SO_4^{2-} ниже и изменяются в пределах 1,51–2,62 мг/л. В нижнем течении р. Ключ концентрации SO_4^{2-} снижаются до 2,59 мг/л.

Концентрации NO_3^- в водах низкого яма (П3), а также в зоне выклинивания грунтовых вод в за-

болоченном лесу (Л1) варьируют в диапазоне 1,83–1,95 мг/л, в остальных пробах, а также в речных водах отмечается повышение содержания NO_3^- до 2,50–3,21 мг/л. В целом рост концентраций NO_3^- в водах связан с процессами распада органических соединений в результате аммонификации и нитрификации, в результате которых азот в конечном счете переходит в нитратную форму.

Содержание HCO_3^- минимально в болотных водах (0–3,05 мг/л) в условиях низкого pH, в водах на приграничных к болоту участках отмечается рост pH и повышение концентрации HCO_3^- в 7 раз. В зоне выклинивания грунтовых вод отмечается повышение содержания HCO_3^- в сравнении с болотом примерно в 50 раз (130–150 мг/л). В речных водах концентрации HCO_3^- снижаются до 17,4–51,9 мг/л.

Повышение содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в водах в целом согласуется с увеличением мощности торфяной залежи исследуемых участков. Так, минимальные концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ (40,5 мг/л) отмечены на участке Л172, где торфяная залежь не сформировалась. Содержание в болотных водах и на приграничных к болоту участках чуть выше (60,2–87,2 мг/л), а более высокое содержание органических веществ отмечено на участке выклинивания грунтовых вод (101,8 мг/л) и в реке. При этом концентрации $\text{C}_{\text{орг}}$ в истоках р. Ключ сопоставимы с содержанием в водах высокого яма (П2), в среднем течении повышаются до 91,5 мг/л, а в нижнем течении снижаются до 70,9 мг/л за счет разбавления.

Растворенный кислород присутствует практически во всех отобранных пробах, а снижение до 0 мг/л отмечается в пробах с высоким уровнем болотных вод либо в местах резкой смены условий (П2 и Л3). Более высокие концентрации O_2 в водах (2,17–2,88 мг/л) отмечены на приграничном участке к болоту (П1) и в зоне формирования руслового стока (Л1).

Анализ данных по торфу показал схожие тенденции в химическом составе. Содержание CaO в исследуемых торфах в заболоченном лесу в целом характеризуется общей тенденцией увеличения к слою 60–70 см и минимумом в пограничном горизонте. Динамика CaO в торфе в целом отражает тенденции грунтового заболачивания территории с выклиниваем жестких вод с высоким содержанием гидрокарбонатов кальция. Содержание MgO в торфяной залежи исследуемых участков ниже, чем CaO и в Л162 в среднем составляет 10174 мг/кг, в Л3 – 7151 мг/кг (рис. 3). Аналогично CaO минимальное содержание MgO отмечается в пограничном горизонте на контакте с подстилающими породами, что свидетельствует о том, что содержание MgO в торфяной залежи определяется не исходным водно-минеральным питанием участка, а внешними условиями, которые определили закономерное по-

вышение концентраций к поверхностному слою. Содержание P_2O_5 в торфяной залежи исследуемых участков имеет резко отличную динамику. Содержание в торфяной залежи в точке Л162 весьма постоянное до глубины 110 см (128,3 мг/кг), а в придонных слоях отмечается резкий скачок концентраций до 669 мг/кг.

Содержание K_2O также имеет схожие тенденции изменения по глубине. В среднем по торфяной залежи ключевых участков содержание K_2O в точке Л162 и Л3 сопоставимо и составило 86,3 и 84,5 мг/кг соответственно. В верхних слоях торфяной залежи 0–40 см обеих точек отбора проб отмечается монотонный рост содержания K_2O с максимумом на поверхности. Также отмечается наличие корреляционных зависимостей между содержанием K_2O и степенью разложения ($r=0,52$), $C_{орг}$ ($-0,61$), что, вероятно, свидетельствует о накоплении K_2O в торфяной залежи в процессе разложения растительных остатков.

В точке Л3 отмечаются более высокие концентрации Fe_2O_3 в торфе (10743 мг/кг) в сравнении с точкой Л162 (7251 мг/кг). При этом, в точке Л162 наблюдается монотонный рост содержания Fe_2O_3 в торфе с глубиной, а максимум отмечается в при-

донном слое. В точке Л3 изменения концентраций Fe_2O_3 по глубине торфяной залежи более динамичны, максимальные концентрации отмечены как на поверхности (12760 мг/кг), так и в придонном слое (14104 мг/кг). Важной особенностью является снижение содержания Fe_2O_3 в подстиляющих породах и повышение в зоне аэрации.

Распределение $N-NO_3^-$ по глубине торфяной залежи в целом имеет сходную динамику в пунктах отбора проб. В торфяной залежи выделяется несколько слоев с повышенными концентрациями $N-NO_3^-$, что, вероятно, индицирует периодическое обсыхание этого участка. Содержание $N-NH_4^+$ в торфяной залежи обратно коррелирует с концентрациями $N-NO_3^-$ ($r=-0,55$), степенью гумификации ($r=-0,56$) и зольностью ($r=0,63$). Распределение $N-NH_4^+$ по глубине торфяной залежи имеет общие закономерности в точках отбора проб, в поверхностном слое отмечается рост содержания, что определяется процессами торфонакопления.

Содержание $C_{орг}$ в торфяной залежи исследуемых участков практически не меняется по глубине, изменяется в диапазоне 41–44 % и характеризуется снижением в пограничном горизонте.

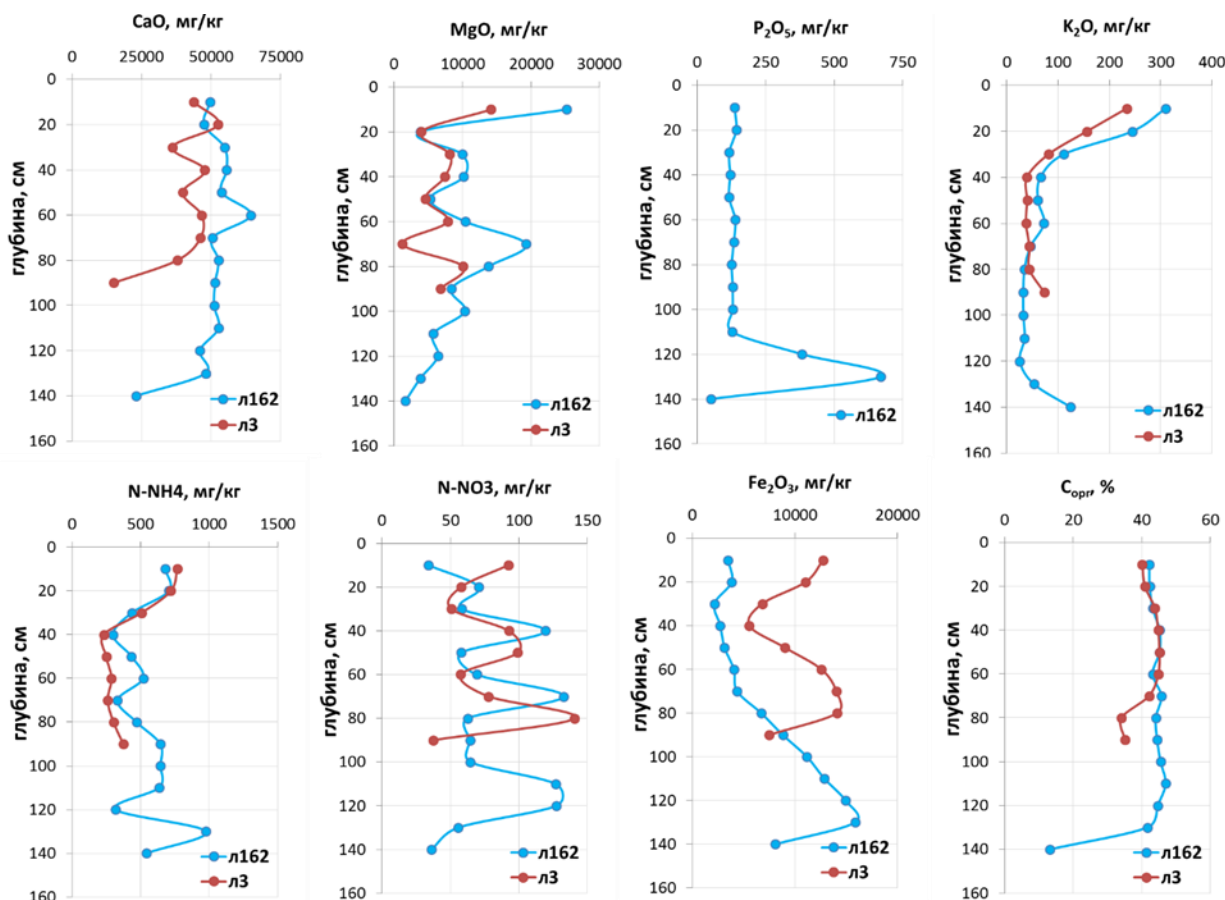


Рис. 3. Вариация химического состава торфяной залежи в заболоченном лесу

Fig. 3. Peat chemistry variation in a swamp forest

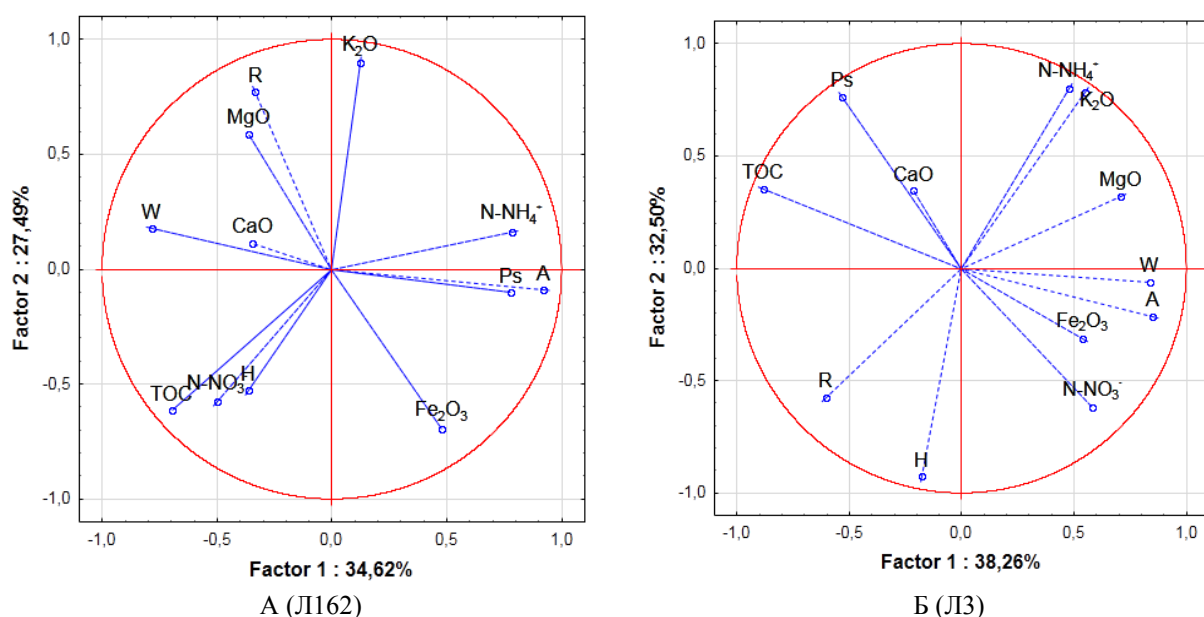


Рис. 4. Диаграммы факторного анализа химического состава и физических свойств торфяной залежи ключевых участков в заболоченном лесу (*R* – степень разложения, %; *W* – влажность торфа, %; *A* – зольность, %; *H* – степень гумификации, %; *Ps* – плотность, г/см³; *TOC* – общий органический углерод, %)

Fig. 4. Factor analysis diagrams of the peat chemical composition and physical properties at key sites in the swamp forest (*R* – degree of decomposition, %; *W* – peat moisture content, %; *A* – ash content, %; *H* – degree of humification, %; *Ps* – bulk density, g/cm³; *TOC* – total organic carbon, %)

Факторный анализ данных по химическому составу торфяной залежи в точке Л162, проведенный с применением метода главных компонент, показал два значимых фактора, которые на 62 % описывают изменчивость в системе (рис. 4). Первая компонента определяет 35 % общей изменчивости данных, а высокие факторные нагрузки имеют влажность торфа (–0,78) и плотность (0,78), зольность (0,92), которые коррелируют с содержанием $C_{\text{орг}}$ (–0,70) и $N-NH_4^+$ (0,78), что отражает процесс торфонакопления при повышении уровня болотных вод. Вторая компонента отражает поступление химических веществ при разложении растительных остатков. Высокие факторные нагрузки имеет степень разложения (0,77), которая коррелирует с содержанием K_2O (0,90), MgO (0,59), а степень гумификации определяет содержание $C_{\text{орг}}$ (–0,61), $N-NO_3^-$ (–0,58) и Fe_2O_3 (–0,69). Третья компонента характеризует процессы осаждения CaO (–0,58) при выклинивании подземных вод, а высокие факторные нагрузки имеют плотность (–0,51) и степень гумификации (–0,63).

Факторная модель точки ЛЗ немного отличается, несмотря на некоторые общие тенденции. Первая компонента определяет 38 % изменчивости в системе, а высокие факторные нагрузки имеет содержание MgO (0,71), Fe_2O_3 (0,54) в торфе, которое находится в прямой корреляции с зольностью (0,85), влажностью (0,84), а в обратной корреляционной зависимости находятся степень разложения

(–0,61), плотность (–0,53) и содержание $C_{\text{орг}}$ (–0,88) в торфе. Вторая компонента чуть менее значима, а высокие факторные нагрузки имеет плотность торфа, которая определяет содержание $N-NH_4^+$ (0,80), K_2O (0,78). Тогда как степень гумификации (–0,93) определяет содержание $N-NO_3^-$ (–0,62). Также выделяется третья компонента, которая характеризует процессы физического осаждения CaO и Fe_2O_3 при выклинивании подземных вод.

Заключение

Таким образом, анализ данных показал повышение концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , $Fe_{\text{общ}}$ в химическом составе вод в заболоченном лесу, что свидетельствует об активности процессов заболачивания на границах Васюганского болота с участием грунтовых вод и снижении влияния атмосферных вод, сбрасываемых с болотного массива. В торфяной залежи отмечается рост содержания CaO и Fe_2O_3 в результате их осаждения в торфе при поступлении подземных вод богатых гидрокарбонатами кальция и соединениями железа.

В верхних слоях торфяной залежи на ключевых участках в заболоченном лесу отмечается повышение содержания K_2O , MgO , $N-NH_4^+$ и $N-NO_3^-$, что связано с процессами разложения растительных остатков и их минерализацией в условиях периодического обсыхания при снижении уровня воды. Как следствие, в водах в заболоченном лесу отмечаются высокое содержание органических веществ, что

приводит к росту концентраций $C_{\text{орг}}$ в речных водах. Химический состав реки Ключ в зоне формирования руслового стока в результате смешения подземных вод, болотных и почвенных вод имеет средний состав, близкий к болотным водам. Однако ниже по течению в речных водах повышается содержание $C_{\text{орг}}$. В среднем за период исследований концентра-

ции $C_{\text{орг}}$ в водах р. Ключ в истоках в заболоченном лесу были выше в 1,54 раза, чем в болотных водах. Таким образом, исследования показали, что зона контакта лес–болото и заболоченный лес, примыкающий к исследуемому участку Васюганского болота, вносит существенный вклад в общий объем выноса $C_{\text{орг}}$ с исследуемой территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности флористического состава и ценотической структуры березовых лесов в экотоне лес–болото на юге Васюганской равнины / Н.В. Климова, Н.А. Чернова, А.Н. Никифоров, А.Г. Дюкарева // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2020. – Т. 13 (1). – С. 25–43. DOI: 10.17516/1997-1389-0314
2. Чернова Н.А., Пологова Н.Н., Климова Н.В. Заболочивание лесов на Васюганской равнине // ИНТЕРЭКСПО ГЕО–СИБИРЬ. – 2013. – Т. 3. – № 4. – С. 65–69.
3. Changes to soil organic matter decomposition rate and its temperature sensitivity along water table gradients in cold-temperate forest swamps / H. Bian, S. Zheng, Y. Liu, L. Xu, Z. Chen, N. He // Catena. – 2020. – Vol. 194. – 104684. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104684
4. Roles of climatic and anthropogenic factors in shaping Holocene vegetation and fire regimes in Great Dismal Swamp, eastern USA / D.A. Willard, M.C. Jones, J. Alder, D. Fastovich, K. Hoefke, R.K. Poirier, F.C. Wurster // Quaternary Science Reviews. – 2023. – Vol. 311. – 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108153>.
5. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков / Е.В. Харюткина, С.В. Логинов, Е.И. Усова, Ю.В. Мартынова, К.Н. Пустовалов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 2. – С. 45–65.
6. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометиздат, 1975. – 280 с.
7. Langlois M.N., Price J.S., Rochefort L. Landscape analysis of nutrient-enriched margins (lagg) in ombrotrophic peatlands // Science of the Total Environment. – 2015. – № 505. – P. 573–586.
8. Effect of topography and thickness of organic layer on productivity of black spruce boreal forest of Canadian Clay Belt region / A. Laamrani, O. Valeria, Y. Bergeron, N. Fenton, L. Cheng, K. Anvomi // Forest Ecology and Management. – 2014. – № 330. – P. 144–157.
9. Graniero P.A., Price J.S. The importance of topographic factor on the distribution of bog and heath in a Newfoundland blanket bog complex // Catena. – 1999. – № 36. – P. 233–254.
10. Перегон А.М. Периферическое заболочивание на юге таежной зоны Западной Сибири: дис. ... канд. биол. наук. – Новосибирск, 2005. – 160 с.
11. Глушков И.В., Сирин А.А., Минаева Т.Ю. Влияние гидрологических условий на формирование водораздельных лесных болот и заболоченных лесов в Центрально-Лесном заповеднике // Лесоведение. – 2016. – № 6. – С. 403–417.
12. Синюткина А.А., Гашкова Л.П. Оценка состояния окраинных частей Большого Васюганского болота (на примере Бакчарского болотного массива) // Почвы и окружающая среда. – 2018. – Т. 1. – № 4. – С. 243–255. DOI: 10.31251/pos.v1i4.43.
13. Sinyutkina A.A. Investigating the peat deposits of the Great Vasyugan Mire margin using ground-penetrating radar // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems, ENVIROMIS 2018. – Tomsk, 05–11 July 2018. – Tomsk: Institute of Physics Publ., 2018. – Vol. 211. – P. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012066.
14. Characteristics of soil carbon emissions and bacterial community composition in peatlands at different stages of vegetation succession / J. Li, M. Li, L. Zhao, X. Sun, M. Gao, L. Sheng, H. Bian // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 839. – Article 156242. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156242
15. Identifying the role of environmental drivers in organic carbon export from a forested peat catchment / E. Ryder, E. de Eyto, M. Dillane, R. Poole, E. Jennings // Science of The Total Environment. – 2014. – Vol. 490. – P. 28–36. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.091
16. Effect of experimental warming on dissolved organic matter and bacterial diversity in a forest swamp soil / Zhao Liyuan, Li Jianwei, Tian Naixu, Li Gaoxiang, Sheng Lianxi, He Chunguang, Bian Hongfeng // Ecological Indicators. – 2024. – Vol. 158. – 111375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111375>.
17. Калюжный И.Л. Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 8. – С. 72–81.
18. Фоновые показатели эколого-геохимического состояния вод верховых болот в таежной зоне на территории Российской Федерации / Т.М. Потапова, М.Л. Марков, А.П. Носаль, О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 83–92. DOI: 10.18799/24131830/2018/9/2091
19. 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.
20. 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.
21. Сравнительный анализ подземных и болотных вод в юго-восточной части Западной Сибири / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Х. Ян, Е.В. Перегудина // Разведка и охрана недр. – 2022. – № 5. – С. 26–33. DOI: 10.53085/0034-026X_2022_05_26.

22. Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostructural studies of climate and peatland carbon dynamic // *Mires and Peat*. – 2011. – Vol. 7. – Article 07. – P. 1–10.

Информация об авторах

Юлия Александровна Харанжевская, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3; доцент, кафедра гидрологии, Геолого-географический факультет, Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, kharan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9945-0129>

Анна Алексеевна Синюткина, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3. ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

Марина Евгеньевна Кириллова, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН, Россия, 634050, г. Томск, ул. Гагарина, 3. kirillovame1965@mail.ru

Поступила в редакцию: 12.12.2024

Поступила после рецензирования: 17.12.2024

Принята к публикации: 16.09.2025

REFERENCES

1. Klimova N.V., Chernova N.A., Nikiforov A.N., Dyukareva A.G. Features of the floristic composition and cenotic structure of birch forests in the forest-swamp ecotone in the south of the Vasyugan Plain. *Journal of the Siberian Federal University. Biology*, 2020, vol. 13 (1), pp. 25–43. (In Russ.) DOI: 10.17516/1997-1389-0314
2. Chernova N.A., Pologova N.N., Klimova N.V. Forest swamping on the Vasyugan Plain. *Interexpo Geo-Siberia*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 65–69. (In Russ.)
3. Bian H., Zheng S., Liu Y., Xu L., Chen Z., He N. Changes to soil organic matter decomposition rate and its temperature sensitivity along water table gradients in cold-temperate forest swamps. *Catena*, 2020, vol. 194, 104684. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104684
4. Willard D.A., Jones M.C., Alder J., Fastovich D., Hoefke K., Poirier R.K., Wurster F.C. Roles of climatic and anthropogenic factors in shaping Holocene vegetation and fire regimes in Great Dismal Swamp, eastern USA. *Quaternary Science Reviews*, 2023, vol. 311, 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108153>.
5. Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Usova E.I., Martynova Yu.V., Pustovalov K.N. Trends in Changes in Climate Extremeness in Western Siberia at the End of the Twentieth and Beginning of the Twenty-first Centuries. *Fundamental and Applied Climatology*, 2019, vol. 2, pp. 45–65. (In Russ.)
6. Ivanov K.E. *Water exchange in mire landscapes*. Leningrad, Gidrometeorological Publ. House, 1975. 280 p. (In Russ.)
7. Langlois M.N., Price J.S., Rochefort L. Landscape analysis of nutrient-enriched margins (lagg) in ombrotrophic peatlands. *Science of the Total Environment*, 2015, no. 505, pp. 573–586.
8. Laamrani A., Valeria O., Bergeron Y., Fenton N., Cheng L., Anvomi K. Effect of topography and thickness of organic layer on productivity of black spruce boreal forest of Canadian Clay Belt region. *Forest Ecology and Management*, 2014, no. 330, pp. 144–157.
9. Graniero P.A., Price J.S. The importance of topographic factor on the distribution of bog and heath in a Newfoundland blanket bog complex. *Catena*, 1999, no. 36, pp. 233–254.
10. Peregon A.M. *Peripheral swamping in the south of the taiga zone of Western Siberia*. Cand. Diss. Novosibirsk, 2005. 160 p. (In Russ.)
11. Glushkov I.V., Sirin A.A., Minaeva T.Yu. Influence of hydrological conditions on the formation of watershed swampy forests in the Central Forest Reserve. *Forest Science*, 2016, no. 6, pp. 403–417. (In Russ.)
12. Sinyutkina A.A., Gashkova L.P. Assessment of the state of the marginal parts of the Great Vasyugan Mire (using the Bakchar Bog as an example). *The Journal of Soils and Environment*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 243–255. (In Russ.) DOI: 10.31251/pos.v1i4.43.
13. Sinyutkina A.A. Investigating the peat deposits of the Great Vasyugan Mire margin using ground-penetrating radar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems, ENVIROMIS 2018*. Tomsk, 05–11 July 2018. Tomsk, Institute of Physics Publ., 2018. Vol. 211, pp. 012066. DOI 10.1088/1755-1315/211/1/012066.
14. Li J., Li M., Zhao L., Sun X., Gao M., Sheng L., Bian H. Characteristics of soil carbon emissions and bacterial community composition in peatlands at different stages of vegetation succession. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 839, Article 156242. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156242
15. Ryder E., De Eyto E., Dillane M., Poole R., Jennings E. Identifying the role of environmental drivers in organic carbon export from a forested peat catchment. *Science of The Total Environment*, 2014, vol. 490, pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.091
16. Zhao Liyuan, Li Jianwei, Tian Naixu, Li Gaoxiang, Sheng Lianxi, He Chunguang, Bian Hongfeng. Effect of experimental warming on dissolved organic matter and bacterial diversity in a forest swamp soil. *Ecological Indicators*, 2024, vol. 158, 111375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111375>.

17. 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 Russ.)
18. Potapova T.M., Markov M.L., Nosal A.P., Savichev O.G. Background indicators of the ecological and geochemical state of raised bog waters in the taiga zone on the territory of the Russian Federation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 83–92. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2018/9/2091.
19. Voistinova 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 Iksa rivers (Western Siberia). *Water Management of Russia*, 2018, no. 3, pp. 16–34. (In Russ.)
20. 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 Russ.)
21. Savichev O.G., Domarenko V.A., Yan H., Peregodina E.V. Comparative analysis of deep groundwater and mire surface waters in the southeastern part of Western Siberia. *Exploration and protection of mineral resources*, 2022, no. 5, pp. 26–33. DOI: 10.53085/0034-026X_2022_05_26.
22. Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeoecological studies of climate and peatland carbon dynamic. *Mires and Peat*, 2011, vol. 7, Article 07, pp. 1–10.

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, 3, Gagarin street, Tomsk, 634050, Russian Federation; associate Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, kharan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9945-0129>

Anna A. Sinyutkina, Cand. Sc., Senior Researcher, 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, Russian Federation. ankalaeva@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-1283-0797>

Marina E. Kirillova, Senior Researcher, 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, Russian Federation. kirillovame1965@mail.ru

Received: 12.12.2024

Revised: 17.12.2024

Accepted: 16.09.2025