

## HYDROCHEMICAL DIFFERENTIATION IN BOG ECOSYSTEMS

*Litvinov L.V.\* , Zarov E.A., Ivanova I.S.*

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск

\*l.l.v.86@icloud.com

**Citation:** Litvinov L.V., Zarov E.A., Ivanova I.S. 2025. Hydrochemical differentiation in bog ecosystems. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(2): 69-80.

**DOI:** 10.18822/edgcc677932

### АННОТАЦИЯ

Олиготрофные болота представлены совокупностью микроландшафтов с изменяющимися глубиной залегания болотных вод и растительностью. Изменчивость данных условий способна влиять на скорость деструкции растительных остатков и эффективность биогенной аккумуляции соединений. Эти процессы оказывают влияние на формирование гидрохимической системы микроландшафта и болота в целом. В работе рассмотрена вариабельность гидрохимических характеристик основных микроландшафтов олиготрофного болота Мухрино, расположенного в подзоне средней тайги Западной Сибири. Целью исследования было выявление характерных особенностей формирования состава болотной воды. В качестве измеряемых параметров были выбраны концентрации катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и анионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , растворённого органического углерода (РОУ) и его спектральные характеристики ( $\text{SUVA}_{254}$ ). Преобладающими ионами в болотных водах являются катионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  и анионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Относительно суммы концентраций измеряемых ионов экосистемы формируют ряд: рямово-мелкомочажинный комплекс (РММК) – открытое болото – грядово-мочажинно-топяной комплекс (ГМТК) – грядово-мочажинный комплекс (ГМК) – типичный рям в порядке увеличения содержания соединений. Гидрохимической особенностью РММК являются высокие концентрации РОУ при низком содержании ионов. Характерным отличием экосистем открытого болота является формирование катионного состава преимущественно за счёт  $\text{K}^+$  и  $\text{NH}_4^+$ . Участки ГМТК характеризуются повышенным содержанием  $\text{SO}_4^{2-}$  в анионном составе воды, тогда как на участках ГМК наблюдаются более высокие концентрации ионов  $\text{Cl}^-$ . Тем не менее воды обеих экосистем демонстрируют низкие концентрации растворённого органического углерода (РОУ) (71,3 и 66,1 мг/л соответственно). Типичный рям отличается наиболее высоким содержанием РОУ (85,8 мг/л) и измеряемых ионов.

**Ключевые слова:** гидрохимия, ионный состав, растворённый органический углерод.

### ABSTRACT

Oligotrophic bogs are presented by a combination of microlandscapes with varying water tables and vegetation. The variability of these features may influence the rate of plant residue decomposition and the efficiency of biogenic compounds accumulation. These processes affect the formation of the microlandscape hydrochemical system and the bog. This study examines the variability of hydrochemical features in the main microlandscapes of the Mukhrino oligotrophic bog, located in the middle taiga subzone of Western Siberia. The study aim was to identify the distinctive features of bog water composition. The measured properties included concentrations of cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ), and anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), dissolved organic carbon (DOC) and its spectral characteristics ( $\text{SUVA}_{254}$ ). The dominant ions in the water are  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  and  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ . Relative to the total measured ion concentrations, the ecosystems form the following order of increasing compound concentration: *ryam-hollow* complex (RHC) – open bog – *ridge-hollow-pool* complex (RHPC) – *ridge-hollow* complex (RHC) – typical *ryam*. A hydrochemical feature of the RHC is high DOC concentrations with low ion content. The open bog ecosystems are characterized by a cation composition dominated by  $\text{K}^+$  and  $\text{NH}_4^+$ . The RHPC exhibit elevated  $\text{SO}_4^{2-}$  in the anionic composition, whereas the RHC areas show higher  $\text{Cl}^-$  concentrations. However, the waters of both ecosystems demonstrate low dissolved organic carbon (DOC) concentrations (71.3 and 66.1 mg/L, respectively). The typical *ryam* stands out with the highest DOC (85.8 mg/L) and measured ion concentrations.

**Key words:** hydrochemistry, ion compound, dissolved organic carbon.

#### Используемые сокращения

РОУ – растворённый органический углерод [Leenheer, Croue, 2003];  
РММК – рямово-мелкомочажинный комплекс [Ivanov, Novikova, 1976];  
ГМК – грядово-мочажинный комплекс [Ivanov, Novikova, 1976];  
ГМТК – грядово-мочажинно-топяной комплекс [Ivanov, Novikova, 1976];

## ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные воды бореального пояса Западной Сибири представляют собой важный гидрохимический объект, вносящий значительный вклад в связь гидрологических систем материковых вод и вод Северного Ледовитого океана. Данные территории характеризуются высокой заболоченностью водосборов крупных рек, что обусловлено низкими среднегодовыми температурами и обилием осадков. Болота, преимущественно олиготрофного (верхового) типа, играют важную роль в формировании химического состава поверхностных вод, выступая в том числе значительными источниками растворённого органического углерода (РОУ). Поступающие с болот воды обогащены органическими соединениями, которые способствуют формированию кислой среды с низким содержанием неорганических компонентов в речных системах [Zarov et al., 2022]. Подобными геохимическими условиями среды характеризуется и сам торф, поровые воды которого являются важным компонентом формирования субстрата для произрастающих в экосистеме растений.

Особенностью олиготрофных болот является доминирование сфагновых мхов, которые выступают видами-эдификаторами экосистемы. Сфагновые мхи адаптированы к условиям дефицита питательных элементов и способны активно подкислять места своего произрастания, что оказывает существенное влияние на химический состав болотных вод [Rudolph, Samland, 1985]. Данный класс макрофитов обычно покрывает всю площадь болота и образует торфяную залежь, оставляя незанятыми лишь участки с открытыми водными поверхностями. По этой причине олиготрофные болота характеризуются малым видовым разнообразием [Filipov, Lapshina, 2008], но при этом их отличительной особенностью является образование различных по видовому составу мозаичных и комплексных структур (грядово-мочажинный комплекс, грядово-мочажинно-озерковые комплексы, рямы). Образование подобных микроландшафтов связывают с внешними факторами, в основном с гидрологическим режимом [Ivanov, 1953].

Ряд исследований указывает на значительное влияние химического состава воды на формирование фитоценозов болотных экосистем [Hartsock, 2021; Tahvanainen et al., 2002]. Так, более трофные участки одного болота зачастую обладают большим видовым разнообразием в сравнении с участками, воды которых менее обогащены неорганическими веществами. Трофность таких участков выражается присутствием в составе воды  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ , что свидетельствует о принадлежности участка к мезотрофному типу питания. В то же время для вод олиготрофных болот характерно увеличение доли содержания  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  [Bourbonniere, 2009]. Химический состав болотных вод формируется под воздействием неравномерной обводнённости участков олиготрофных болот, где в зависимости от степени аэрации торфяной залежи варьируется эффективность биогенной аккумуляции минеральных соединений [Stepanova, Pokrovsky, 2011]: высокая аэрированность способствует высвобождению аккумулярованных минеральных соединений, содержащихся в растительных остатках.

Основным источником минерального питания для растительности олиготрофных болот являются соединения и элементы, поступающие из атмосферы. В связи с высокой пресностью болотной воды повышение минерализации атмосферных выпадений способно изменять условия формирования болотных фитоценозов. По этой причине ненарушенные верховые болота являются крайне чувствительными к антропогенному загрязнению атмосферы [Potapova, Novilov, 2006; Preis et al., 2010]. Трансформация гидрогеохимических условий территории влечёт за собой изменения растительных сообществ [Savichev, 2016]. В долгосрочной перспективе результаты мониторинга ионного состава воды различных экосистем олиготрофных болот служат индикатором аэротехногенных нарушений территории на локальном и региональном уровнях [Potapova, Novilov, 2006; Preis et al., 2010]. Кроме того, установление вариабельности гидрохимических параметров в пределах эталонного участка, которым принято считать олиготрофное болото

Мухрино [Dyukarev et al., 2021], позволит выявить вклад отдельных экосистем в итоговый состав речных вод. Это открывает возможности для прогнозирования транспорта растворённого вещества с заболоченного водосбора.

Исходя из различных экологических условий в пределах болотных микроландшафтов, предполагается наличие дифференциации экосистем относительно гидрохимических характеристик.

Целью данного исследования было изучение основных гидрохимических параметров и их микроландшафтное распределение относительно фитоценозов, сформированных на участке олиготрофного болотного массива Мухрино. В качестве измеряемых показателей выступили растворённый органический углерод, коэффициент его ароматичности ( $SUVA_{254}$ ) и ионный состав воды.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования относится к подзоне средней тайги Западной Сибири и расположена в 20 километрах к юго-западу от г. Ханты-Мансийска. Рассматриваемый участок представлен ненарушенным верховым болотом, где организован международный полевой стационар Мухрино (кафедра ЮНЕСКО «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата», Югорский государственный университет). В структуре болотного массива выделяются грядово-мочажинный комплекс с кустарничково-сфагновыми грядами и сфагновыми мочажинами, открытое болото с кустарничками, пушицей и редкими низкими соснами, а также осоко-сфагновые экосистемы. Наиболее обводнённые участки представлены олиготрофными шейхциериево-сфагновыми и мезоолиготрофными осоково-сфагновыми топями. Периферийные участки болота представлены типичными рослыми рядами – древесно-кустарничково-сфагновыми биоценозами с небольшими сфагново-травянистыми мочажинами. Лесные фитоценозы вблизи болотного массива относятся к мелколиственным, темнохвойным и смешанным лесам [Dyukarev et al., 2021; Ivanov, 1953].

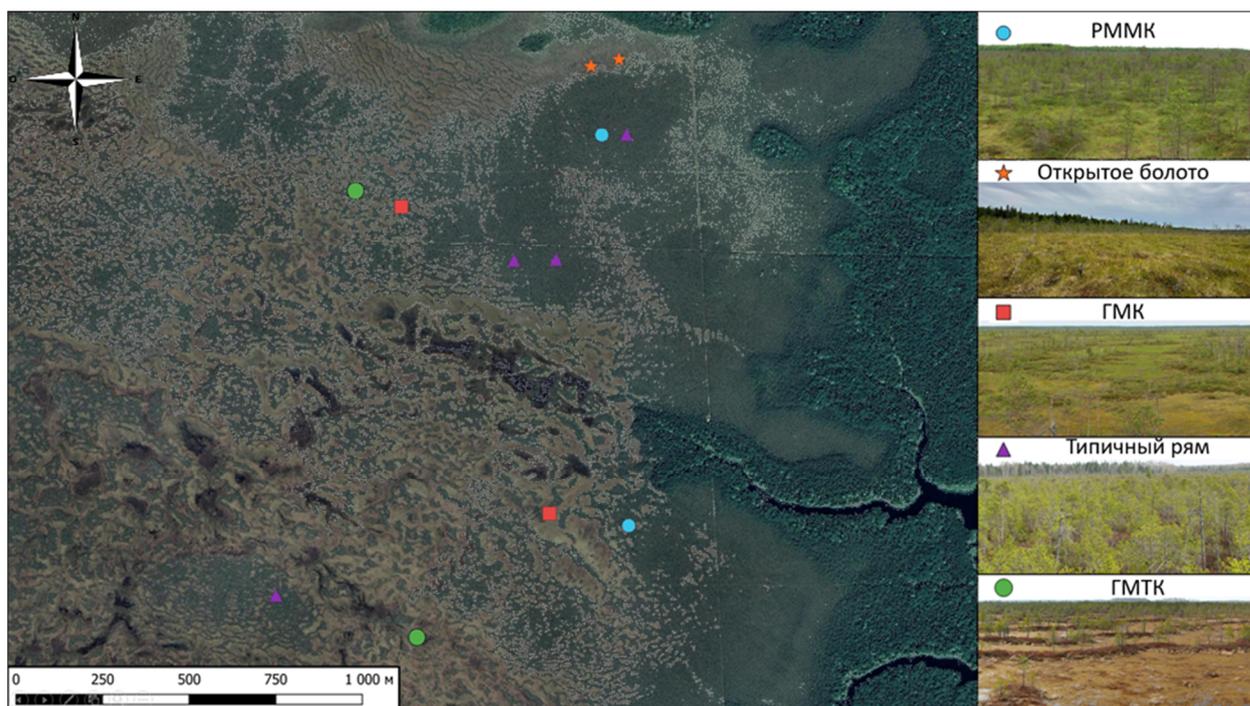
Климат исследуемой территории характеризуется продолжительной, суровой зимой с устойчивым снежным покровом и коротким теплым летом. Среднемесячная температура января составляет  $-19.2 \pm 0.8$  °С, среднемесячная температура июля составляет  $17.1 \pm 0.28$  °С. Суммарное годовое количество осадков в среднем составляет  $470 \pm 68$  мм с максимумом, приходящимся на август-сентябрь (72-84 мм) [Dyukarev et al., 2021].

В период с конца июня и до начала августа 2023 года сотрудниками Югорского государственного университета было заложено 12 пробных площадей, охватывающих все типы болотных экосистем, где было отобрано 95 образцов воды. Каждая пробная площадь апробировалась однократно в течение указанного полевого сезона. Период отбора образцов соответствовал сезону межени. На каждой пробной площади закладывались точки отбора проб воды с учетом неоднородности микрорельефа (Рис. 1, Табл. 1, Appendix). Для определения гидрохимических особенностей экосистем олиготрофного болота, помимо показателей кислотности среды (рН) и электропроводности, были измерены концентрации растворённых ионов ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ), растворённого органического углерода и коэффициент его ароматичности ( $SUVA_{254}$ ). Исходя из показателя кислотности среды ( $pH \approx 3,5$ ), определение концентраций  $HCO_3^-$  и  $CO_3^{2-}$  не проводилось.

На основе результатов выполненного ботанического описания были выделены следующие типы растительных сообществ: типичный рям, грядово-мочажинный комплекс, грядово-мочажинно-топяной комплекс, открытое болото, рямово-мелкомочажинный комплекс (Табл. 1). Относительно обводнённости рассматриваемые экосистемы образуют ряд: открытое болото – ГМТК – ГМК – РММК – типичный рям.

Отбор проб воды производился путем вырезания лунок размером 15x15 см и глубиной до 50 см в участке болота, которые наполнялись болотной водой. Образцы воды отбирались в предварительно промытые емкости из тёмного стекла (объём 60 мл) и хранились в холодильнике не более трех дней при температуре +4 °С в период транспортировки. Непосредственно в

лаборатории перед началом аналитических работ образцы воды были отфильтрованы через шприцевой фильтр (размер пор 0.45  $\mu\text{m}$ , Whatman) и анализировались.



**Рис. 1.** Территория и точки исследования.

**Fig. 1.** Study site location.

Гидрохимические показатели воды (рН, электропроводность и температура воды) были измерены при помощи портативного полевого прибора Combo (Hanna, HI98129). Уровни болотных вод в каждой лунке были зафиксированы при помощи гидрогеологической рулетки после ее заполнения водой (20-30 минут).

Определение концентрации ионов в воде было выполнено на ионном хроматографе Metrohm 882 IC compact plus (Швейцария), оснащённом кондуктометрическим детектором. В качестве подвижной фазы использовались растворы азотной кислоты (4 ммоль) для определения катионов и смесь карбоната и гидрокарбоната натрия (339.2 и 84 мг), соответственно, для определения анионов. Для анализа использовались хроматографические колонки Metrosep C4-150/4.0 и Metrosep Supp 19-250/4.0 (Швейцария). В целях предотвращения загрязнения колонок использовались предколонки соответствующих моделей. Перед проведением анализа хроматографические колонки промывались два часа. Для калибровки прибора были использованы стандартные образцы ионов аммония, калия, кальция, магния, натрия, нитрата, сульфата, фосфата и хлорида (1 г/л, «ЦСОВВ», Россия). Результаты измерений интерпретированы в виде процента от суммы эквивалентных содержаний катионов и анионов.

Определение концентрации растворённого органического углерода проводилось на элементном анализаторе Thermo Scientific Flash-2000 (Германия), откалиброванном по стандарту мочевины. Определение индекса  $SUVA_{254}$  проходило на UV-спектрофотометре PERESEE T8DCS (Китай) как отношение интенсивности поглощения света при длине волны 254 нм к концентрации  $POY$  [Weishaar et al., 2003].

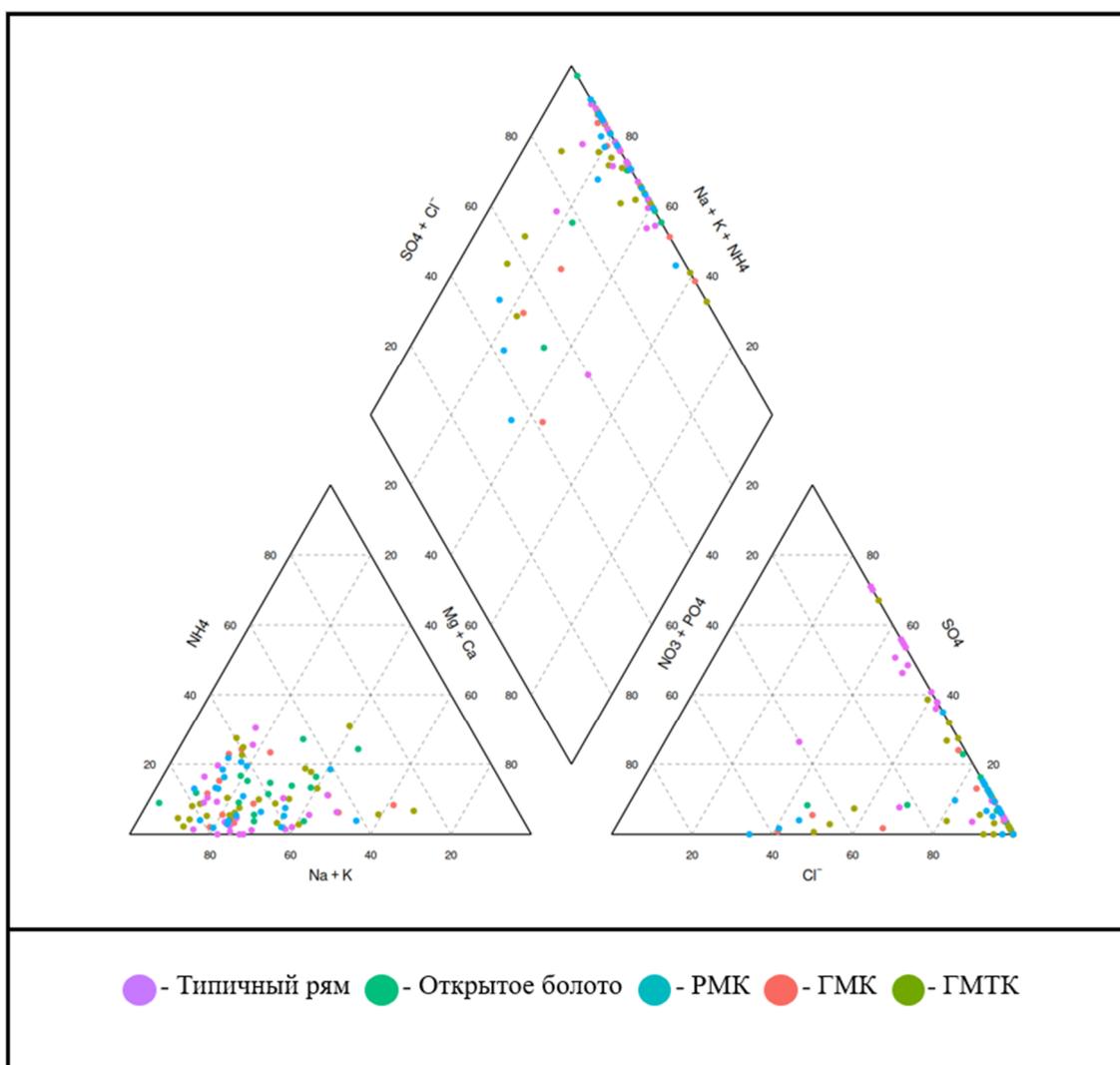
### Статистические методы и визуализация данных

В качестве инструмента статистической обработки был использован метод главных компонент (PCA) – способ уменьшения размерности с применением евклидовых расстояний и матрицы корреляций при помощи выявления принципиальных (главных) направлений, охватывающих максимальную дисперсию данных [Maćkiewicz et al., 1993]. В качестве исходных переменных были выбраны концентрации всех определяемых ионов, содержание растворённого органического углерода и индекс  $SUVA_{254}$ .

Статистические расчеты и визуализация графиков были выполнены на языке программирования R [R Core Team, 2020] с применением пакета ‘ggplot2’ [Wickham, 2016] для визуализации данных, ‘dplyr’ [Hadley, 2014].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Сумма ионов в болотных водах рассматриваемых экосистем увеличивается в ряду: рямово-мелкомочажинные комплексы (РММК) – открытое болото – грядово-мочажинно-топяной комплекс (ГМТК) – грядово-мочажинный комплекс (ГМК) – типичный рям. Болотные воды обогащены органическим веществом (концентрация РОУ более 90% суммы измеряемых веществ по массе). Средние значения рН и электропроводности равны  $3,45 \pm 0,14$  и  $79,6 \pm 21,9$  соответственно. Катионный состав воды преимущественно представлен соединениями  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  (до 70% и 56% соответственно) (Рис. 2, Табл. 2). Концентрации фосфатов изменяются в диапазоне 0,01-0,015 мг/л. Преобладающими неорганическими анионами являются сульфаты и хлориды, где содержание  $\text{Cl}^-$  изменяется от 29% в наиболее сухих участках до 100% в обводнённых. Доля сульфатов увеличивается в болотных водах более сухих экосистем (до 70%). Исключением являются РММК, где при глубоком залегании болотных вод содержание сульфатов варьируется в пределах 1-15% от массы анионов.



**Рис. 2.** Распределение ионного состава болотных вод в исследованных экосистемах на диаграмме Пайпера.

**Fig. 2.** Distribution of the ion composition of bog waters in the studied ecosystems on the Piper diagram.

Измеряемые ионы имеют наименьший вклад в гидрохимическую систему РММК, где их общее содержание варьируется в пределах 1,75-3,38 мг/л при высокой электропроводности ( $98,15 \pm 16,0 \mu\text{Sm/cm}$ ) и содержании РОУ ( $85,5 \pm 17,4 \text{ мг/л}$ ) (Рис. 3). Ионный состав данной экосистемы представлен наименьшим разбросом значений. В катионном составе в большей степени представлены подвижные  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  (0,7 мг/л и 0,58 мг/л соответственно). Растворённый минерализованный азот экосистемы чаще представлен аммонийными соединениями (0,22 мг/л  $\text{NH}_4^+$  против 0,004 мг/л  $\text{NO}_3^-$ ). Наименьший вклад вносят катионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , составляя лишь 22% от доли эквивалентных катионов. В неорганическом анионном составе преобладают хлорид-ионы (не менее 90%).

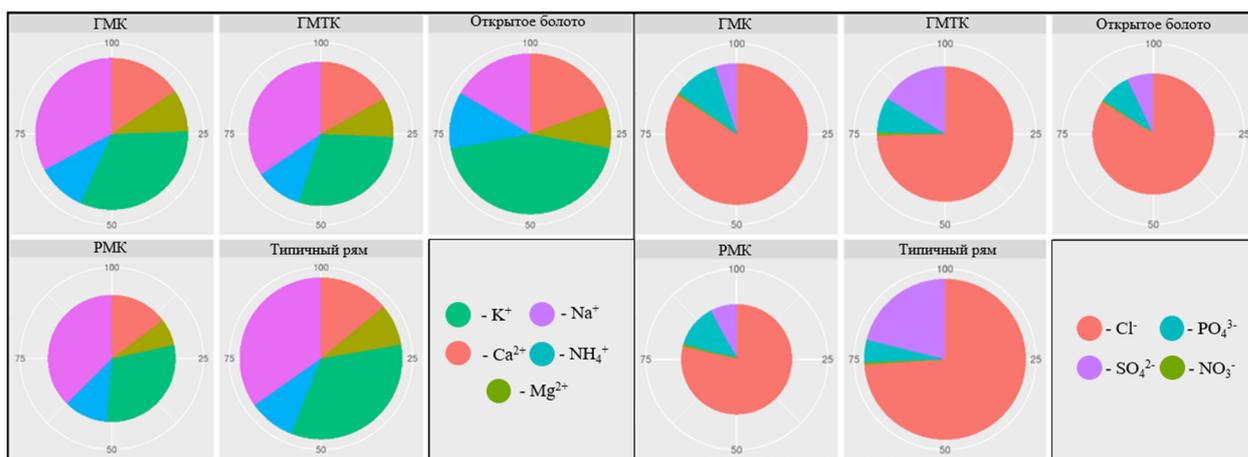


Рис. 3. Соотношение ионов в различных экосистемах.

Fig. 3. The ratio of ions in different ecosystems.

Противоположная ситуация наблюдалась на участках типичного рям, для которых характерен наибольший вклад измеряемых неорганических соединений (в среднем 6%, или 4.92 мг/л от общей суммы растворенного вещества) в химический состав вод экосистемы. Отмечено высокое содержание ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  (со средней концентрацией 0.48 мг/л и максимальным значением 1.1 мг/л) при полном отсутствии анионов  $\text{PO}_4^{3-}$  и  $\text{NO}_3^-$ . Содержание хлоридов в пробах варьирует в пределах 0,27-7,39 мг/л. Катионный состав вод отличается повышенными концентрациями  $\text{Na}^+$  (в среднем 0,97 мг/л, или 73% от доли эквивалентных катионов) в сравнении с другими экосистемами. Схожими характеристиками обладают участки ГМК и ГМТК. Основной гидрохимической особенностью данных фитоценозов является низкая концентрация РОУ ( $67,53 \pm 14,76$  и  $63,86 \pm 5,13 \text{ мг/л}$  соответственно). Химический состав вод экосистем также различен – для ГМТК характерно растворение  $\text{SO}_4^{2-}$ , тогда как гидрохимическая особенность ГМК заключается в повышенном содержании фосфатов (0,16 мг/л в сравнении с 0,019 мг/л в рьях).

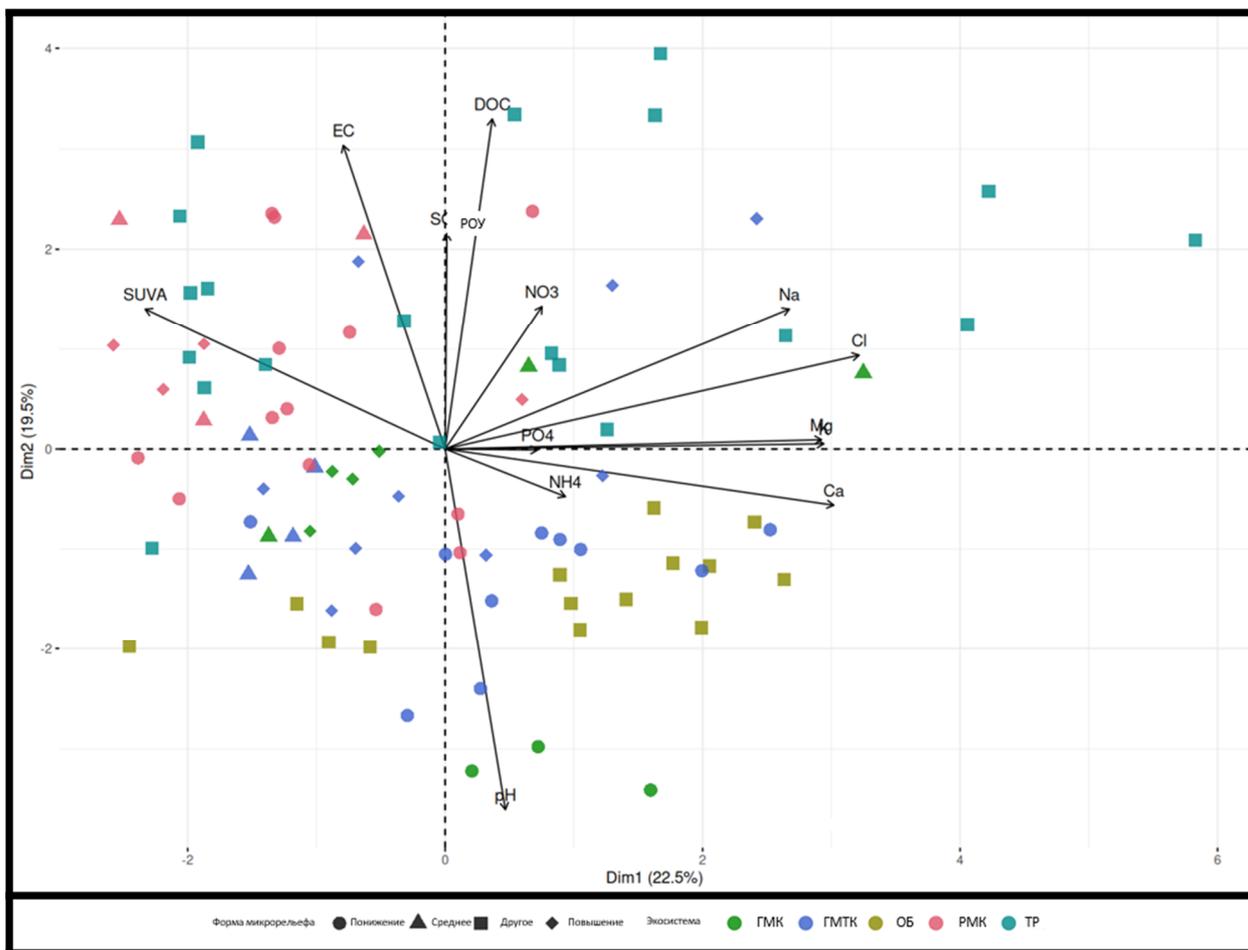
Для экосистем открытого болота характерно образование катионного состава преимущественно за счёт  $\text{K}^+$  и  $\text{NH}_4^+$ . Содержание данных ионов имеет среднюю концентрацию  $1,25 \pm 0,61 \text{ мг/л}$  (45% от суммы катионов) для  $\text{K}^+$  и  $0,32 \pm 0,12 \text{ мг/л}$  для  $\text{NH}_4^+$ , что на 30-40% превышает средние значения данных ионов для всего болота ( $0,858 \pm 0,63 \text{ мг/л}$  и  $0,25 \pm 0,18 \text{ мг/л}$  соответственно). При этом доля  $\text{Na}^+$  (19% от суммы катионов),  $\text{Cl}^-$  (81% от суммы анионов) и  $\text{SO}_4^{2-}$  (9% от суммы катионов) уменьшается. Также отмечено повышение концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  на 4% (до уровня 16% от суммы катионов) относительно среднего содержания в болотных водах. Концентрации остальных компонентов находятся в пределах средних значений, обнаруженных в болотной воде.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты частично соотносятся с деятельным горизонтом (акротеллом) торфяной залежи, однако для торфов рассматриваемого болота свойственно накопление Ca, в то

время как в болотных водах чаще характерны его низкие концентрации с частым преобладанием одновалентных катионов Na и K [Stepanova, Pokrovsky, 2011]. Это может быть связано как с большей растворимостью Na и K по сравнению с Ca, так и с взаимодействием Ca с гуминовыми веществами, уменьшающими его подвижность.

В результате проведённой статистической обработки гидрохимических показателей был создан график, полученный с применением метода главных компонент (Рис. 4).



**Рис. 4.** Распределение точек наблюдений в пространстве главных компонент.  
**Fig. 4.** Distribution of sample points in the principal component space.

Полученное облако точек относительно первой главной компоненты делится на группы, сонаправленные с показателями кислотности, ЕС и содержанием РОУ. Для болотных экосистем с низким УБВ характерны наиболее кислые и минерализованные воды с высоким содержанием РОУ, тогда как для участков с высоким УБВ характерно уменьшение этих показателей.

Отмечается высокая сонаправленность переменных ЕС, РОУ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ . По данным переменным разошлись участки типичных рямов и гряд. Ось индекса ароматичности органических соединений ( $\text{SUVA}_{254}$ ) описывается второй компонентой и расположена под прямым углом относительно оси РОУ и имеет обратную корреляцию с ионным составом в гидрохимической системе.

Группа ионов, за исключением  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , выделяется в отдельный кластер. Вдоль осей данных переменных исследованные экосистемы ориентированы от увеличения концентрации ионов к их уменьшению. Наибольшее количество обозначенных ионов обнаруживается в водах типичного ряма и открытого болота, а также в мочажинах в ГМТК, и наименьшее – в РММК и грядках.

Группировка точек происходит относительно увлажнённости экосистем. На это указывает нагрузка на переменные рН, ЕС и РОУ, где относительно них формируются две крупные группы

скопления точек – ГМК и типичный рям. Внутри данных групп относительно расположения вдоль первой компоненты выделяются три кластера – РММК, ГМТК и открытое болото.

Распределение всех точек относительно химического состава воды происходит за счет нагрузки на переменные  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ . Для РММК свойственно образование облака в условиях низких концентраций ионов относительно всей гидрохимической системы. Участки открытого болота характеризуются высокими концентрациями ионов при низком значении РОУ.

В качестве характерных гидрохимических особенностей экосистем выступает ряд растворённых соединений. Типичные рьямы характеризуются относительно большим количеством  $\text{SO}_4^{2-}$ -ионов, что объясняется как окислительной средой в торфах, так и способностью к усваиванию меньшей доли  $\text{SO}_4^{2-}$  в процессе деятельности сульфатредуцирующих микроорганизмов ввиду увеличения аэробного слоя торфяной залежи. Это обусловлено обилием сосудистых растений с развитой ризосферой и глубоким залеганием болотных вод. Наиболее схожими характеристиками обладают грядово-мочажинные комплексы, но при детальном сравнении становится очевидной тенденция к уменьшению выноса сульфатов при увеличении выноса фосфатов, что является их отличительной гидрохимической особенностью.

Несмотря на ботаническое сходство типичных рямов и РММК, для последних характерна низкая доля неорганической фракции в составе болотных вод, при этом отмечается возрастание содержания ионов  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{PO}_4^{3-}$ . Это делает экосистему более схожей с обводнёнными территориями болот, но в рассматриваемом случае для неё свойственна повышенная концентрация органического углерода.

Наиболее увлажнёнными участками олиготрофного болота являются проточные открытые болота, для которых характерны низкие концентрации растворенного органического вещества относительно других экосистем. Гидрохимической особенностью экосистемы является относительно повышенное содержание  $\text{K}^+$ , что может объясняться низкими темпами биологического потребления в анаэробных условиях [Stepanova, Pokrovsky, 2011].

Взаимосвязь РОУ и электропроводности объясняется значительным превышением концентрации РОУ по отношению к неорганическим компонентам в гидрохимической системе болот. Учитывая длительные засушливые периоды и высокие температуры во время отбора проб (средняя температура июля  $+19,7$  °C), высокая сходимостъ компонентов  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{NO}_3^-$  с РОУ может быть объяснена повышенными темпами минерализации amino- и сульфатсодержащих органических соединений [Updegraff et al., 1995]. Однако нахождение оси иона аммония на отдалении относительно рассматриваемых компонент противоречит процессу минерализации органических соединений, содержащих азот [van der Perk, 2006]. Допускается внесение рассматриваемых ионов из атмосферы [Smolyakov, 2000].

Противоположное направление осей индекса  $\text{SUVA}_{254}$  и ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  объясняется меньшей степенью гумификации РОУ и снижением его сорбционной ёмкости по отношению к упомянутым ионам в условиях повышенного pH относительно других участков болота [Volkov, 2016].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были исследованы гидрохимические характеристики болотных вод, отобранных в типичных фитоценозах верхового болота. Основной целью работы являлось выявление особенностей формирования химического состава воды в пределах различных болотных экосистем. Обнаруженные особенности состава болотных вод чаще связаны с глубиной залегания вод.

Характерной особенностью вод экосистем с низким УБВ (типичный рям, РММК) является высокая концентрация РОУ относительно других участков. Внутригрупповое разделение более сухих участков происходит относительно высоких или низких концентраций неорганических соединений. Так, РММК отличается переходным статусом между участками типичного рьяма и ГМК – содержание РОУ имеет высокие значения, в то время как ионный состав схож с более обводнёнными участками. Наиболее обводнённые участки (открытое болото, ГМК) чаще

характеризуются низким содержанием неорганических соединений. При этом в водах открытого болота характерно значительное растворение соединений  $K^+$  из отмерших растительных остатков.

Показатель содержания РОУ взаимосвязан с рН и ЕС, что объясняется его преобладанием в гидрохимической системе и формированием основных условий среды. Выраженным отличием более сухих экосистем является высокий индекс  $SUVA_{254}$ , что вызвано ускоренными темпами разложения высокомолекулярных соединений в условиях повышенной аэрации торфа.

Пространственный анализ описывает 44% детерминации состава проб в первых двух поколениях. Первая компонента описывает основные гидрохимические характеристики олиготрофных болот (рН, ЕС, РОУ). Нагрузка ионов  $SO_4^{2-}$  и  $NO_3^-$  на данную ось объясняется влиянием осадков на состав болотной воды. Вторая компонента описывает предрасположенность рассматриваемых экосистем к изменениям в ионном составе воды. Наибольшей сходимостью с данной группой обладают рямы и открытые болота. В первом случае это объясняется наличием менее устойчивых к деструкции высших автотрофов и ускоренными темпами деструкции отмерших растительных остатков в условиях высокой аэрации торфа. Предрасположенность участков открытых болот к осям минеральных соединений объясняется низким биологическим потреблением микроэлементов в анаэробных условиях.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 25-27-00272 «Вынос растворенного органического вещества и сопряженных с ним микроэлементов из верхового болота, его трансформация в гидрологическом континууме».

## APPENDIX

ГМК		Открытое болото		Типичный рям		РММК	
№ ПП	Участок	№ ПП	Участок	№ ПП	Участок	№ ПП	Участок
1.1-1.4, 3.1-3.6, 6.6-6.10	Мочажина	4.1, 4.3, 4.6, 5.3, 5.4, 5.6	Межкочье (небольшая мочажина)	7.1-7.4, 7.6, 7.8, 8.2, 8.4, 8.5, 8.7, 8.8, 9.2-9.4, 9.6-9.8	Кочка  (повыше- ние)	10.1-10.5, 11.1-11.5, 12.6-12.10	Мочажи- на
2.7, 3.4, 3.9, 3.13, 6.4, 6.12	Межкочье	4.2, 4.4, 4.5, 4.7, 4.8, 5.1, 5.2, 5.5, 5.7, 5.8	Кочка	7.5, 7.7, 8.1, 8.3, 8.6, 9.1, 9.5	Межкочье  (пониже- ние)	12.5, 12.11, 12.13	Меж- кочье
2.2, 2.4, 2.5, 2.6, 3.7, 3.8, 3.10- 3.12, 6.1, 6.2, 6.5, 6.11, 6.13	Кочка	-	-	-	-	12.1-12.4, 12.12	Кочка

**Таблица III.** Типы растительных сообществ.  
**Table III.** Types of vegetation communities.

Экосистема		ГМК	ГМТК	Открытое болото	РММК	Типичный рям
pH	max	3,7	3,71	3,64	3,58	3,55
	min	3,3	3,28	3,47	3,19	3,11
ЕС	max	80	83	76	123	141
	min	47	67	42	63	74
DOC	max	105,5	106,09	86,56	134,02	103,68
	min	50,95	55,69	53,74	68,83	59,0
Na	max	2,11	2,02	1,26	1,15	3,74
	min	0,26	0,35	0,14	0,22	0,32
NH <sub>4</sub>	max	0,67	0,66	0,46	0,42	0,77
	min	0,04	0,06	0,09	0,03	0,01
K	max	2,2	2,48	2,21	1,24	2,38
	min	0,21	0,25	0,39	0,12	0,51
Mg	max	0,42	0,49	0,45	0,48	0,43
	min	0,09	0,08	0	0,11	0,08
Ca	max	0,66	0,21	0,94	0,79	0,18
	min	0,17	0,12	0,17	0,15	0,76
Cl	max	4,89	4,5	2,26	1,77	7,39
	min	0,27	0,1	0,28	0,27	0,27
NO <sub>3</sub>	max	0,02	0,04	0,01	0,03	0,06
	min	0	0	0	0	0
PO <sub>4</sub>	max	0,71	0,82	0,77	0,77	0,7
	min	0	0	0	0	0
SO <sub>4</sub>	max	0,29	0,98	0,29	0,14	1,1
	min	0	0	0	0	0,1

**Таблица П2.** Гидрохимические характеристики болотных экосистем, мг/л.  
**Table П2.** Hydrochemical characteristics of bog ecosystems, mg/l.

## ЛИТЕРАТУРА

- Bourbonniere R.A. 2009. Review of water chemistry research in natural and disturbed peatlands. *Canadian Water Resources Journal*, 34(4): 393-414.
- Dyukarev E., et al. 2021. The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia: The Mukhrino bog case study. *Land*, 10(8): 824.
- Filippov I.V., Lapshina E.D. 2008. Types of mire microlandscapes in lake-mire systems of the Middle Ob region. *Dynamics of the Environment and Global Climate Change*, 1(S1): 115-124.
- Hartsock J.A., et al. 2021. A comparison of plant communities and water chemistry at Sandhill Wetland to natural Albertan peatlands and marshes. *Ecological Engineering*, 169: 106313.
- Ivanov K.E. 1953. *Hydrology of Mires*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe Izdatelstvo.
- Ivanov K.E., Novikov S.M. 1976. *Bogs of Western Siberia: Their structure and hydrological regime*. Leningrad: Nauka.
- Leenheer J.A., Croue J.P. 2003. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter. *Environmental science & technology*, 37(1): 18A-26A pp.
- Maćkiewicz A., Ratajczak W. 1993. Principal components analysis (PCA). *Computers & Geosciences*, 19(3): 303-342.
- Minaeva T.Yu., Sirin A.A. 2011. Biological diversity of mires and climate change. *Advances in Modern Biology*, 131(4): 393-406.
- Potapova T.M., Novikov S.M. 2006. Assessment of anthropogenic changes in the chemical composition of mire waters and dissolved substance runoff from natural and reclaimed raised bogs. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Nauki o Zemle*, (2): 85-95.
- Preis Yu.I., Bobrov V.A., Sorokovenko O.R. 2010. Features of modern mineral matter accumulation in oligotrophic mires of the southern forest zone in Western Siberia. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, (336): 204-210.
- R Core Team. 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. URL: <https://www.r-project.org/>
- Rudolph H., & Samland J. 1985. Occurrence and metabolism of Sphagnum acid in the cell walls of bryophytes. *Phytochemistry*, 24: 745-749.
- Savichev O.G., et al. 2016. Hydrogeochemical conditions of oligotrophic mire ecosystem formation. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, (5): 60-69.
- Smolyakov B.S. 2000. The problem of acid deposition in the north of Western Siberia. *Siberian Ecological Journal*, 1: 21-30.
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S. 2011. Major element composition of peat in convex raised bogs of the middle taiga in Western Siberia (a case study of the Mukhrino bog complex). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, (352): 211-214.
- Tahvanainen T., et al. 2002. Spatial variation of mire surface water chemistry and vegetation in northeastern Finland. *Annales Botanici Fennici*, 235-251.
- Terentyeva I.E., et al. 2021. Mapping taiga mires in Western Siberia using remote sensing data. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 84(6): 920-930.
- Updegraff K., et al. 1995. Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands. *Ecological Applications*, 5(1): 151-163.
- Volkov I.V. Reactions of trace elements with humic acids as the basis for sorption decontamination and purification of man-made waste: dissertation for the degree of Candidate of Chemical Sciences: 02.00. 04 : dis. B. I., 2016.
- van der Perk M. 2006. *Data and Error Analysis*. London: Taylor and Francis Group.
- Weishaar, J., et al. 2003. Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon. *Environmental Science & Technology*, 37(20): 4702-4708. DOI: 10.1021/es030360x
- Wickham H. 2009. plyr: Tools for splitting, applying and combining data. R package version 0.1.9.
- Wickham H. 2016. Data Analysis. In: ggplot2. Use R! Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-24277-4\_9
- Zarov E.A., et al. 2022. Water table and dissolved organic carbon seasonal dynamic at the different ecosystems of the ombrotrophic bog (Mukhrino, West Siberia). *Smart and Sustainable Cities Conference*, 169-180.

Поступила в редакцию: 01.12.2024  
Переработанный вариант: 03.07.2025  
Принято в печать: 04.07.2025  
Опубликована: 23.07.2025