

Геохимия болотных вод голоценового разреза Большого Убинского рьяма (Барабинская лесостепь)

© 2025 А. Е. Мальцев ¹, Ю. И. Прейс ², Г. А. Леонова ¹, А. А. Ломова ¹

¹ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, проспект Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

²ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект, 10, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: preisyui@rambler.ru

Цель исследования. Изучить химический состав и закономерности формирования болотных вод Большого Убинского рьяма в голоцене.

Место и время проведения. Объектом исследования стали болотные воды Большого Убинского рьяма, расположенного в лесостепной зоне Западной Сибири, на южной границе Барабинской низменности, отобранные в сентябре 2024 г.

Методы. Титриметрический, капиллярный электрофорез, фотометрический методы для определения ионного состава болотных вод. Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) для определения Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, B, Mn, Sr, Sb. Содержание растворенных органического и неорганического углерода определены на анализаторе Multi N/C 2100S. Аутигенные минералы Fe детектированы с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU с системами микроанализа.

Основные результаты. Впервые для Большого Убинского рьяма был получен химический состав болотных вод по всему разрезу торфяных отложений. Концентрация большинства основных ионов и химических элементов в болотных водах уменьшается от торфов низинного типа к переходным и верховым, т.к. в последних водно-минеральное питание осуществляется лишь за счет атмосферных аэрозолей и зольной части минерализующейся растительной биомассы. Близость залегания подстилающих пород, восстановительные условия среды, а также разрушение ряда минералов и фильтрация грунтовых вод через подошвенный горизонт торфяной залежи обуславливают повышение в болотных водах низинных торфов концентраций Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Si, B, Mn, Sr. В сравнении с низинными и переходными торфами, в болотных водах верхового торфа отмечается более высокое содержание Al, Fe, Sb. Вниз по разрезу наблюдается смена ассоциаций аутигенных минеральных фаз железа: верховые торфа характеризуются развитием оксидов и гидроксидов, а низинная часть торфяной залежи характеризуется присутствием сульфидов Fe (пирит).

Заключение. Полученные данные убедительно демонстрируют, что вертикальная геохимическая зональность болотных вод напрямую обусловлена генетическим типом торфа и литологией подстилающих минеральных отложений.

Ключевые слова: болотные воды; рьям; геохимия; растворенное органическое вещество; микроэлементы; аутигенные минералы Fe; Барабинская лесостепь.

Цитирование: Мальцев А.Е., Прейс Ю.И., Леонова Г.А., Ломова А.А. Геохимия болотных вод голоценового разреза Большого Убинского рьяма (Барабинская лесостепь) // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 4. е332. DOI: [10.31251/pos.v8i4.332](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.332)

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического состава болотных вод имеет важное значение для понимания процессов истории развития и формирования торфяников, преобразования органического вещества торфа, перераспределения химических элементов и реконструкции климатических обстановок голоцена. Многие проблемы в исследовании биогеохимии болот, газового режима, функционирования торфяно-болотных экосистем, микробиологических процессов не могут быть в полной мере решены без изучения болотных вод, пронизывающих толщу торфяных отложений (Савичев, 2009, 2015; Савичев и др., 2013). В мире достаточно большое внимание уделяется изучению как биогеохимии торфяных отложений, так и геохимии болотных вод торфяников (Helmer et al., 1990; Steinmann, Shotyk, 1997; Shotyk et al., 2001; Malawskaand, Wilkomirski, 2004; Gorham, Janssens, 2005; Stanton et al., 2007; Kempster et al., 2017; Griffiths et al., 2019; и др.). Подобные исследования активно проводятся для болот лесной и лесостепной зон Западной Сибири. Например, можно привести ряд работ по геохимии разрезов торфяников (Ефремова и др., 2003; Архипов, Бернатонис, 2013; Бобров и др., 2013; Веретенникова 2013; Харанжевская и др., 2017; Савичев и др., 2019а, 2019б; Водяницкий и др., 2019; Веретенникова

и др., 2021; Леонова и др., 2022а; Stepanova et al., 2015; Rudmin et al., 2018; и др.) и геохимии болотных вод (Савичев, 2009; Савичев, Шмаков, 2012; Савичев и др., 2013; Шварцев и др., 2012; Скороходова, Савичев, 2013; Савичев, 2015; Иванова и др., 2017; и др.), а также основополагающие работы В.К. Бахнова (1971, 1972, 1986), изучавшего как химический состав болотных вод, так и торфа рямов южной границы Барабинской лесостепи.

Болотные воды являются объектом обширного изучения; исследуется водообмен и водный баланс болотных ландшафтов, химический состав болотных вод, биогеохимические аспекты и т.д. (Инишева, Инишев, 2000, 2001; Шварцев, 2002). Тем не менее, и нерешенных проблем остается немало: в частности, состав органических соединений, которые доминируют в болотных водах, связи между составом болотных и подземных вод, выявление закономерностей изменения химического состава болотных вод по территории, типу болота и глубине торфяной залежи, распределение и миграция химических элементов, влияние микроорганизмов на химический состав болотных вод, изменение состава болотных вод под влиянием хозяйственной деятельности и многое другое (Шварцев и др., 2012; Бобров и др., 2013; Скороходова, Савичев, 2013; Савичев, 2015; Савичев и др., 2019а; Иванова и др., 2017). Помимо этого, большое количество исследований химического состава болотных вод проводится не по всему разрезу торфяника, а только по его верхнему деятельному слою (до 1 м) и/или по одиночным точкам отбора проб (4–8), исключая непрерывное опробование торфяной залежи (Архипов, Бернатонис, 2013; Скороходова, Савичев, 2013; Савичев и др., 2019а, 2019б; Иванова и др., 2017). Довольно мало работ по изучению закономерностей изменения химического состава болотных вод по глубине торфяной залежи (Савичев, Шмаков, 2012; Шварцев и др., 2012). Еще менее изучены механизмы трансформации химического состава болотных вод в процессе раннего диагенеза болотных отложений. Это ставит проблему биогеохимических исследований болотных вод и их трансформации по всему разрезу торфяной залежи в ряд чрезвычайно актуальных как в теоретическом, так и практическом аспектах.

Цель работы – изучить химический состав и закономерности формирования болотных вод Большого Убинского яма в голоцене.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В пределах юга Западной Сибири весьма отчетливо выражены ландшафтные зоны – лесная, лесостепная и степная. В лесостепной зоне Барабинской аккумулятивной равнины распространены верховые сосново-кустарничково-сфагновые болота – рямы. Они располагаются на южной границе ареала распространения верховых болот (Валуцкий, 1991). Эти рямы сформировались в конце суббореального периода в условиях похолодания и повышения влажности климата (Лисс и др., 2001) или в период последующего потепления (Прейс и др., 2022). В первом случае происходила постепенная олиготрофизация болот, во втором – катастрофическая, при деградации многолетнемерзлого водоупора, сформировавшегося в торфяной залежи в период предшествующего похолодания. Объектом исследования стали болотные воды Большого Убинского яма, расположенного в лесостепной зоне Западной Сибири, на южной границе Барабинской низменности (рис. 1).

На выбранном участке яма выполнено геоботаническое обследование с описанием растительного покрова и микрорельефа. В сентябре 2024 г. проведен отбор оцёса (верхний слой живого мха) и бурение торфяной залежи до подстилающих грунтов торфяным буром БТГ-1 в 3-х параллельных скважинах в юго-восточной части болота с координатами: 55°18'40" с.ш., 79°42'25" в.д. Зольность (А, %), влажность (W, %), степень разложения (R, %) и плотность абсолютно сухого торфа (P_{act} , г/дм³) определялись согласно стандартной методике (Лиштван, Король, 1975).

Болотную воду (свободную и связанную) получали из 10- и 20-сантиметровых фрагментов торфа путем отжима в пресс-форме с помощью гидравлического пресса *Omec PI.88.00* с минимальным давлением (<1 psi) в герметичные пробирки, чтобы ограничить доступ кислорода. Воду из органо-минеральных отложений и глин получали при давлении ~3000 psi. В отобранной болотной воде сразу измеряли неустойчивые физико-химические параметры – водородный показатель (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (Eh) с помощью рН-метра *Анион 4100*. Затем болотную воду фильтровали через мембранный фильтр с порами диаметром 0,45 мкм для микроэлементного анализа и определения растворенного углерода. Далее воду на микроэлементный анализ консервировали добавлением концентрированной азотной кислоты марки особо чистая (ОСЧ) в соотношении 1:100; воду на гидрохимический анализ (ионы) не консервировали и не фильтровали.

Определение содержания анионов в болотных водах проводили титриметрическим методом (HCO_3^-) и методом капиллярного электрофореза (Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , F^-) с использованием системы *Agilent 7100*. Содержание NH_4^+ измеряли фотометрическим методом с реактивом Несслера.

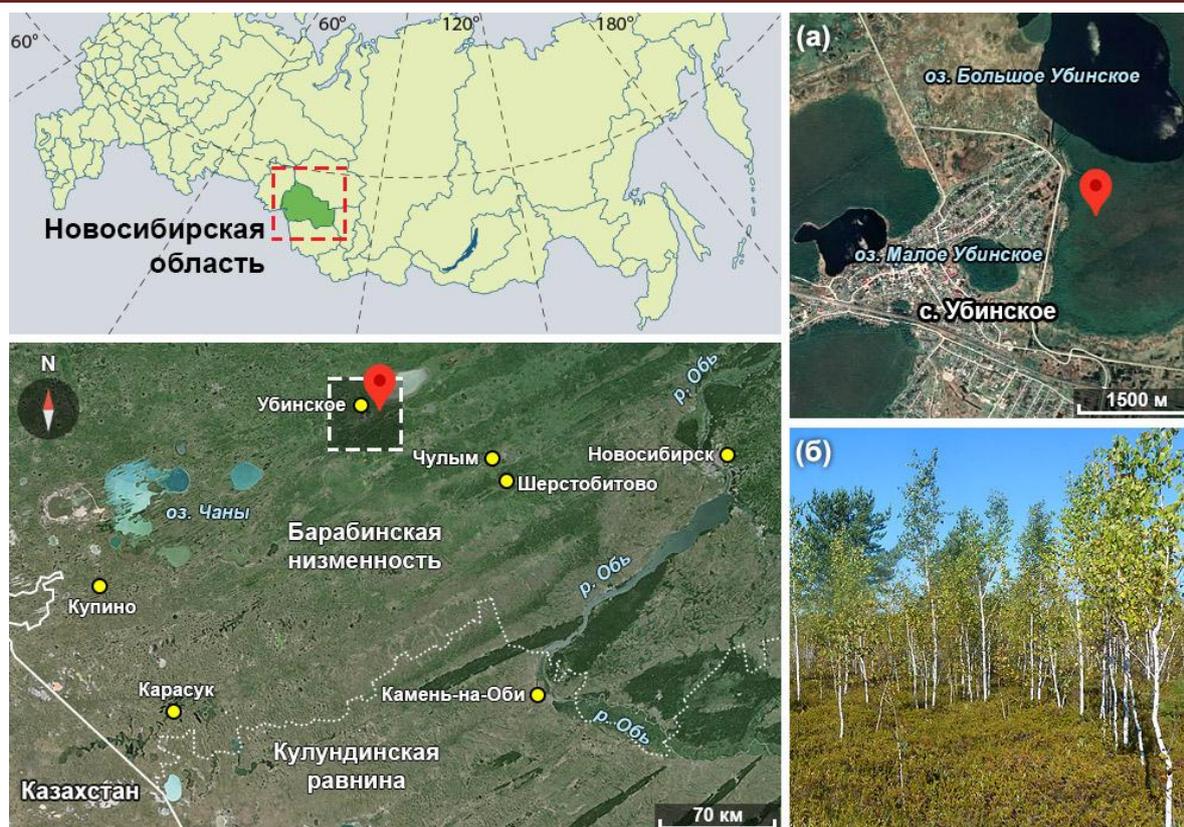


Рисунок 1. Расположение района исследования (а) и общий вид растительных сообществ, микрорельеф и строение нижних ярусов рьяма (б).

Концентрацию растворенного H_2S в болотных водах определяли по стандартной методике (Волков, Жабина, 1980) фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином с предварительной консервацией пробы. Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) в отфильтрованных и подкисленных пробах болотной воды установлены концентрации макро- и микроэлементов: Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, B, Mn, Sr, Sb. Определение содержания растворенных органического и неорганического углерода в отфильтрованных болотных водах проводилось на анализаторе *Multi N/C 2100S*.

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) применяли для изучения микроморфологии, вещественного состава образцов торфа и содержащихся в них минеральных фаз с использованием сканирующего электронного микроскопа *TESCAN MIRA 3 LMU* с системами микроанализа *Aztec Energy XMax 50+* и *INCA Wave 500* (Oxford Instruments Nanoanalysis). Использовали различные режимы детектирования: режим вторичных электронов, позволяющий получить данные о морфологии рельефа; режим отраженных электронов или режим фазового контраста, который дает возможность получить картину распределения электронной плотности в исследуемой пробе; режим характеристического рентгеновского излучения, позволяющий провести рентгеноспектральный микроанализ и получить данные по элементному составу образца, которая способствует идентификации минерала (Goldstein et al., 1981).

Для количественной оценки силы и направления линейной связи между парами ионов и микроэлементов был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r) на основе объединенного набора данных. Обработка проводилась с использованием статистического ПО (*Python* с библиотеками *pandas*, *scipy.stats* и *matplotlib*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика рьяма. Торфяной разрез на Большом Убинском рьяме заложен в юго-восточной части болота (рис. 1 А). В настоящее время здесь представлен постпирогенный мезоолиготрофный березово-кустарничково-сфагновый фитоценоз (рис. 1 Б). Разреженный древесный ярус образован березой (*Betula pubescens* Ehrh.) высотой (h) от 1,5 до 4,5 м, диаметром (d) – 1,0–3,5 см, с сомкнутостью крон (P) – 0,2 и единичными соснами (h – до 2,5 м). Густой травяно-кустарничковый ярус (h – до 40 см, с суммарным проективным покрытием ($пп$) – до 80%) образован багульником (*Ledum*

palustre L.) – 60%, кассандрой (*Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench) – 60%, андромедой (*Andromeda polyfolia* L.) – 5%, клюквой мелкоплодной (*Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.) – 5%, брусничкой (*Vaccinium vitis-idae* L.) – 5%, пушицей влагалищной (*Eriophorum vaginatum* L.) – 5%; морозка (*Rubus chamaemorus* L.) – встречается единично. Напочвенный моховой покров из *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr. и *S. divinum* Flatberg & K. Hassel сплошной, хорошо развит, межкочечные понижения, занимающие всего 5% площади, заняты *S. angustifolium* (C.E.O.Jensen ex Russow) C.E.O.Jensen. Микрорельеф представлен сфагновыми кочками и подушками (h – 15–25 см, d – 0,25–1,0 м, P – 95%).

Стратиграфия торфяных отложений и свойства торфа. Проведены детальные (с шагом 3–5 см) исследования стратиграфии и свойств торфяных отложений Большого Убинского яра (рис. 2).

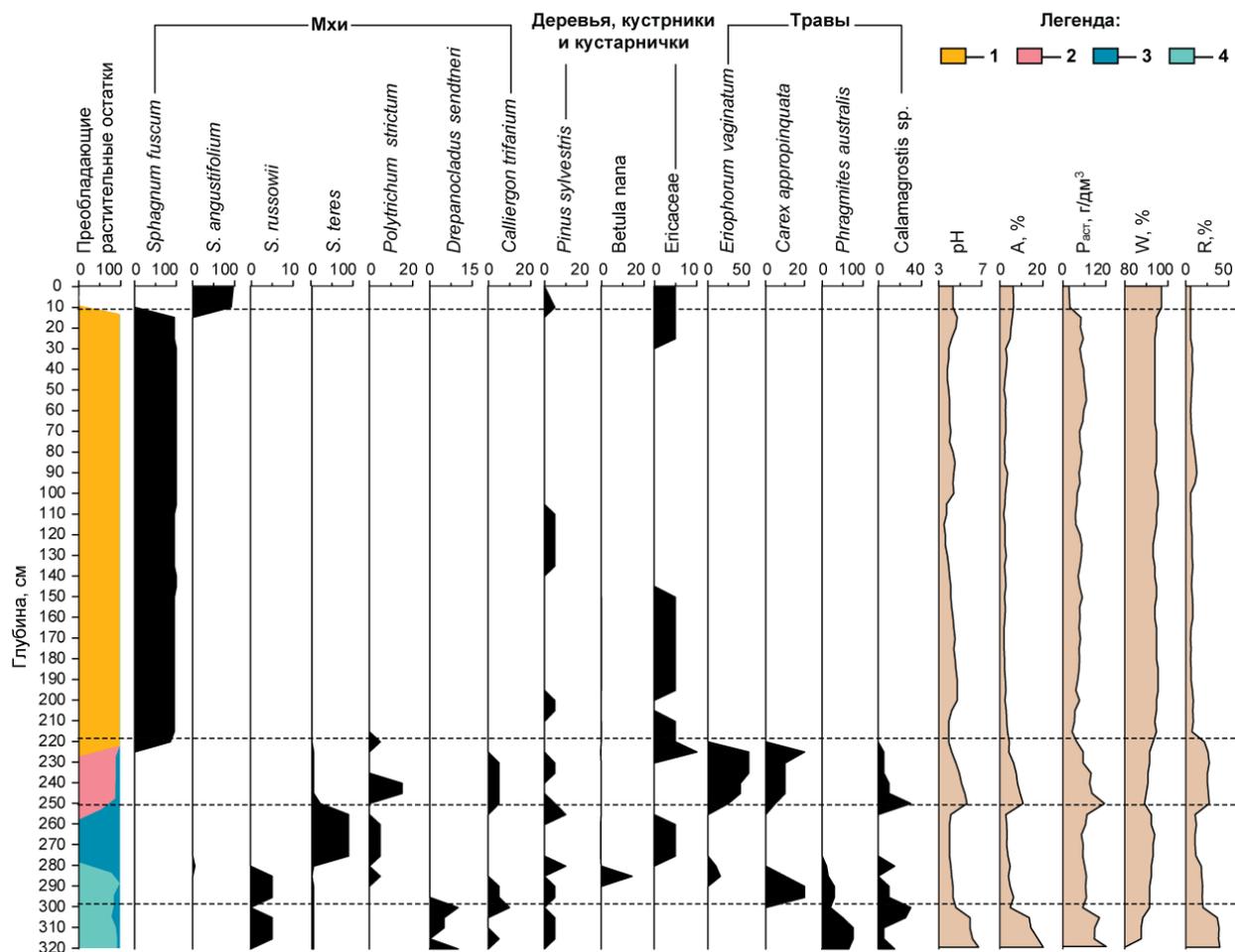


Рисунок 2. Стратиграфическая колонка и свойства торфа. А – зольность (%), P_{act} – плотность абсолютно сухого торфа ($г/дм^3$), W – влажность (%), R – степень разложения (%). Преобладающие растительные остатки: 1) *Sphagnum fuscum*, 2) *Eriophorum vaginatum*, 3) *Sphagnum teres*, 4) *Phragmites australis*.

На ключевом участке яра торфяная залежь имеет мощность 3,2 м. Очёс состоит из сфагнового мха (*Sphagnum angustifolium*). Верхние 10 см разреза представлены ангустифолиум торфом. Ниже торфяная залежь состоит из двух слоев: 1) светлый, слаборазложившийся ($R = 5,8–8,8\%$), очень однородный, низкзолный ($A = 1,80–5,17\%$), «кислый» ($pH = 3,5–4,7$) – верховой фускум торф, залегающий в интервале 10–220 см; 2) более темный торф в интервале 220–320 см. Слой 220–250 см представлен переходным, черным пушицево-гипновым торфом – это горелый слой с повышенными значениями зольности ($A = 6,32–10,67\%$), плотности ($P_{act} = 56–116 г/дм^3$), пониженной влажностью ($W = 88,3–90,5\%$) и средней степени разложения – 21,8–27,5% (рис. 2). В слое 250–300 см залегают низинные низкзолные ($A = 2,76–6,39\%$) терес и осоково-тростниковый торфа с более высокими значениями $pH = 4,2–5,6$ и $4,0–4,6$, соответственно. Для данного горизонта характерны более низкие показатели $P_{act} = 52–67 г/дм^3$ и повышенная влажность ($W = 91,0–93,4\%$). Судя по наличию угольков и повышенным значениям зольности ($A = 4,71–6,39\%$) в слоях 275–280 и 285–295 см Большой Убинский яра неоднократно горел и на эвтрофной стадии развития. Ниже 300 см залегают более высокзолный

($A = 4,71-18,07\%$) и более плотный ($P_{act} = 87-144 \text{ г/дм}^3$), но менее влажный ($W = 86,8-91,1\%$) тростниковый торф с $pH = 5,9-6,7$. Интервал 320–325 см является переходным между торфяником и подстилающими породами, которые в интервале 325–340 см представлены органо-минеральными отложениями (ОМО), сменяющимися затем глинами (340–370 см). Радиоуглеродный возраст (^{14}C) всей торфяной залежи составляет 4350 ± 70 л. н., согласно датированию придонного образца торфа с глубины 310 см (Лисс и др., 2001).

Общая характеристика болотных вод. Проведенный анализ проб болотных вод из разреза торфяной залежи Большого Убинского ряма выявил четкую вертикальную зональность в распределении физико-химических параметров, форм растворенного углерода и общей минерализации (табл. 1).

Таблица 1

Физико-химические параметры, содержание углерода и минерализация болотных вод

Глубина, см	pH	Eh, мВ	РНУ, мг/л	РОУ, мг/л	$\Sigma_{и}$, мг/л
Очёс (мох)	4,30	+281	5,6	61,4	52,41
0–10	3,57	+410	<0,1	81,0	27,21
30–40	3,59	+374	<0,1	76,4	24,82
60–70	3,64	+317	<0,1	92,5	24,74
110–120	3,82	+312	<0,1	88,8	23,49
170–180	3,95	+301	<0,1	104,4	41,20
220–230	4,27	+249	<0,1	105,0	145,29
260–270	5,53	–176	<0,1	124,2	143,65
280–290	5,71	–224	3,1	86,3	162,74
325–335	6,51	–347	1,3	74,4	256,36
340–350	6,64	–126	9,1	21,3	406,84

Примечание.

Eh – окислительно-восстановительный потенциал, РНУ – растворенный неорганический углерод, РОУ – растворенный органический углерод, $\Sigma_{и}$ – сумма главных ионов, <0,1 – значения меньше предела обнаружения метода.

Наблюдается ярко выраженный тренд изменения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и кислотности (pH) болотных вод с глубиной. Верхняя часть разреза (0–220 см) характеризуется крайне кислой средой ($pH = 3,57-3,95$) и положительными значениями Eh (от +390 до +301 мВ). Это указывает на интенсивную окислительную обстановку, типичную для аэрируемой (кислородной) зоны торфяника, где протекают процессы окисления органического вещества (ОВ). Глубина ~220–260 см является переходной зоной, где значение pH повышается (4,27), а Eh резко падает (+249 мВ), что свидетельствует об исчерпании свободного кислорода. Нижняя часть разреза (глубже 260 см) характеризуется слабокислыми ($pH = 5,53-5,71$) условиями среды и резко восстановительной обстановкой, где значения Eh становятся отрицательными (от –176 до –224 мВ), что является признаком активных анаэробных процессов. Подстилающие торф ОМО и глины (325–350 см) уже имеют близкие к нейтральным значения pH (6,51–6,64), а для первых характерна еще и сильно восстановительная обстановка (–347 мВ на глубине 325–335 см).

Концентрация **растворенного органического углерода (РОУ)** высока на всем протяжении разреза торфа (76,4–124,2 мг/л), что типично для болотных вод, богатых гуминовыми веществами (Шварцев и др., 2012). В окислительной зоне (0–220 см) наблюдается общая тенденция увеличения содержания РОУ с глубиной – от 81,0 до 104,4 мг/л. В восстановительной зоне торфяника (220–320 см) наблюдается некоторое увеличение значений РОУ с максимумом 124,2 мг/л на глубине 260–270 см. Подстилающие торф минеральные отложения характеризуются заметным снижением РОУ до 21,3–74,4 мг/л. В окислительной зоне концентрация **растворенного неорганического углерода (РНУ)** меньше предела обнаружения метода. В восстановительной зоне РНУ детектируется и его концентрации составляют 1,3–9,1 мг/л, при этом максимальные значения РНУ установлены у подошвы разреза.

Общая минерализация болотных вод, рассчитанная как сумма главных ионов ($\Sigma_{и}$), демонстрирует четкий аккумулятивный тренд с глубиной. В верхней части разреза (0–120 см) минерализация болотных вод самая низкая (23,49–27,21 мг/л), без значительных колебаний, что, в целом, характерно для атмосферного типа питания верхового торфяника (Бобров и др., 2013). Глубже

по разрезу отмечается некоторое увеличение минерализации болотных вод до 41,2 мг/л, а при переходе к низинному типу торфа (220–290 см) происходит резкий скачок минерализации – до 143,65–162,74 мг/л. Для подстилающих торф ОМО значения минерализации достигают 256,36 мг/л, с максимумом у подошвы – 406,84 мг/л.

Отдельно стоит выделить моховой очёс, отобранный с поверхности торфяника. Несмотря на то, что его среда окислительная (+281 мВ), значение Eh в очёсе существенно ниже, чем в деятельном слое торфа на глубине 0–10 см (+390 мВ). Значение pH в болотной воде, полученной из очёса, составляет 4,30, что значительно выше, чем в непосредственно подстилающем его торфе (pH = 3,57). Принципиальным отличием является наличие РНУ в болотной воде очёса (5,6 мг/л), в то время как в нижележащих горизонтах торфа (до глубины 260 см) его концентрация ниже предела обнаружения. При этом концентрация РОУ в очёсе (61,4 мг/л) ниже, чем в болотных водах торфяной залежи, включая приповерхностный горизонт (81 мг/л). Общая минерализация в болотной воде очёса (52,41 мг/л) почти в два раза выше, чем в поверхностном горизонте торфа 0–10 см (27,21 мг/л).

Основной ионный состав. Проведенные гидрохимические исследования болотных вод выявили закономерности в распределении концентраций основных ионов по глубине торфяной залежи Большого Убинского яма, которые совпадают со сменой типа торфа (рис. 3).

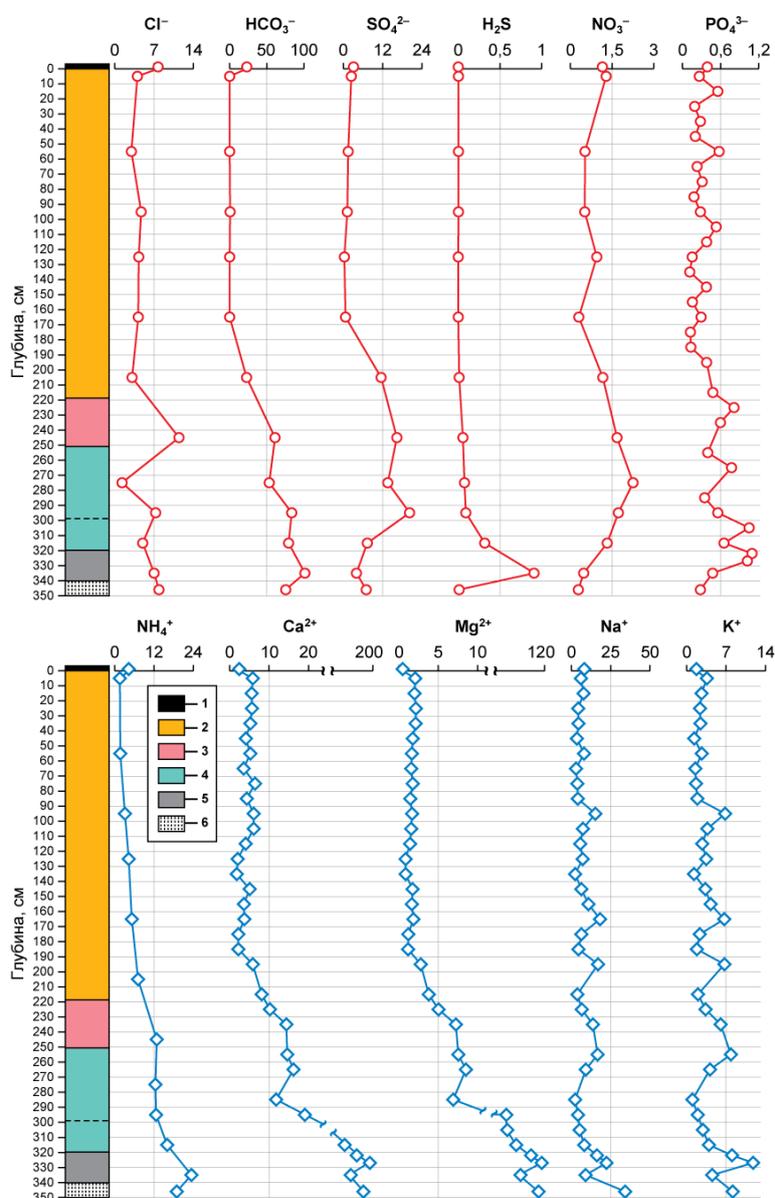


Рисунок 3. Распределение основных ионов (мг/л) и растворенного H₂S (мг/л) по профилю торфа. Стратиграфическая колонка: 1) очёс (живой мох), 2) верховой торф, 3) переходный торф, 4) низинный торф (пунктиром отделен высокозольный торф), 5) органо-минеральные отложения, 6) подстилающие глины.

Для верхового торфа (до 200 см) концентрации гидрокарбонатов ниже предела обнаружения метода, за исключением пробы с глубины 90–100 см (0,6 мг/л). Значимые концентрации HCO_3^- наблюдаются только с глубины 200–210 см (22,9 мг/л) и затем резко возрастают, достигая значений 61,0–83,9 мг/л в интервале 240–350 см. Стоит отметить, что несмотря на отсутствие гидрокарбонат-иона в верхних горизонтах торфа, в болотных водах отчёса содержание HCO_3^- составляют 23 мг/л. Концентрация хлоридов во всем разрезе торфа относительно стабильна и колеблется в пределах 3,0–4,7 мг/л, без выраженного тренда по глубине. Отмечаются несколько пиков Cl^- : в болотных водах отчёса (7,7 мг/л), на глубинах 240–250 см (11,4 мг/л – самый значимый) и 290–300 см (7,3 мг/л), а также в ОМО и подстилающих глинах (7,0–7,9 мг/л). Стоит также отметить интервал 270–280 см с резким падением концентраций хлорид-иона до 1,3 мг/л.

В распределении сульфатов наблюдается тенденция роста их концентрации с глубиной. Так, отчёт и верхняя часть торфяного разреза (0–100 см) характеризуется значениями SO_4^{2-} на уровне 1,24–3,10 мг/л. В интервале 120–170 см наблюдается минимальная концентрация сульфат-иона (0,30–0,68 мг/л), а ниже, в интервале 200–290 см, содержание SO_4^{2-} значительно возрастает (11,5–16,36 мг/л), достигая локального максимума 20,24 мг/л на глубине 290–300 см. С глубины 300 см концентрация SO_4^{2-} вновь снижается до 4,0–7,3 мг/л. Содержание растворенного сероводорода демонстрирует противоположный характер распределения. Для верхней части торфяника (0–170 см) оно не превышает 0,0007–0,0031 мг/л, но начиная с глубины 200–250 см концентрация H_2S последовательно увеличивается на порядки величин: от 0,0115–0,0902 мг/л до абсолютного максимума 0,3173–0,9740 мг/л на глубине 310–340 см. Для подстилающих глин характерно снижение концентрации растворенного сероводорода до 0,0096 мг/л.

Наблюдается выраженная тенденция к увеличению концентрации ионов NH_4^+ с глубиной. Так, в верхних слоях торфа (0–60 см) содержание аммония минимально и составляет 1,56–1,71 мг/л. В интервале 60–200 см его концентрация возрастает до 3,1–7,1 мг/л, а с глубины 210 см наблюдается значительный рост содержания NH_4^+ – до 12,44–12,80 мг/л, достигая абсолютного максимума (18,9–23,4 мг/л) в органо-минеральных отложениях и глинах (330–350 см). В болотных водах отчёса концентрация NH_4^+ составляет 4,3 мг/л. Противоположный тренд характеризует распределение нитрат-иона: максимальная концентрация зафиксирована в отчёсе (1,15 мг/л) и самой верхней части разреза (1,29 мг/л). На глубине 20–170 см содержание NO_3^- снижается примерно в 2 раза и составляет 0,3–0,95 мг/л. Глубже по разрезу (до 320 см) концентрация нитратов значительно возрастает – до 1,17–2,26 мг/л, резко снижаясь в ОМО и глинах (до 0,29–0,48 мг/л).

Распределение фосфат-иона не демонстрирует четкой зависимости с глубиной: концентрации PO_4^{3-} варьируют в широком диапазоне от 0,116 до 1,092 мг/л. Наибольшие значения фосфатов зафиксированы на глубинах 280–290 см (1,047 мг/л) и 325–330 см (1,019 мг/л), а наименьшие – в интервале 130–150 см (0,12 мг/л). Значения концентраций анионов NO_2^- и F^- в болотных водах были ниже пределов обнаружения метода.

В интервале 0–220 см концентрация ионов кальция варьирует в диапазоне 1,78–8,13 мг/л, без четкой динамики. На глубине 220–240 см фиксируется увеличение Ca^{2+} (10,17–14,4 мг/л), за которым следует его стремительный рост (низинный торф) до абсолютного максимума 177,22 мг/л в органо-минеральных отложениях (325–330 см). В составе подстилающих глин (340–350 см) содержание Ca^{2+} остается высоким – 152,11 мг/л. Характер распределения ионов магния полностью повторяет динамику кальция – данная пара ионов имеет сильную положительную корреляцию ($r = 0,98$). Концентрация Mg^{2+} в верхней и средней (переходный торф) части разреза не превышает 2,78 мг/л. В низинном высокозольном торфе с глубины 300–310 см (13,29 мг/л) начинается резкое увеличение содержания Mg^{2+} , достигая максимума 111,11 мг/л в ОМО (325–330 см) и снижаясь до 102,46 мг/л в подстилающих глинах (340–370 см).

Распределение ионов натрия и калия сходно между собой, что подтверждает сильная прямая корреляция (0,96). В интервале 0–300 см концентрации Na^+ и K^+ колеблются в диапазонах 2,37–18,28 мг/л и 1,29–6,81 мг/л, соответственно, с отдельными пиками на глубинах 160–170 см и 190–200 см. На глубине 300–310 см в высокозольном низинном торфе наблюдается резкое увеличение их концентраций со значительным ростом содержания натрия (до 34,17 мг/л) в минеральных отложениях (340–370 см).

Элементный состав болотных вод. Характер распределения Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, В, Mn, Sr, Sb показал, что поведение растворённых компонентов в болотных водах разреза торфа Большого Убинского рья принципиально неоднородно (рис. 4). По характеру распределения химические элементы разделяются на три условные группы.

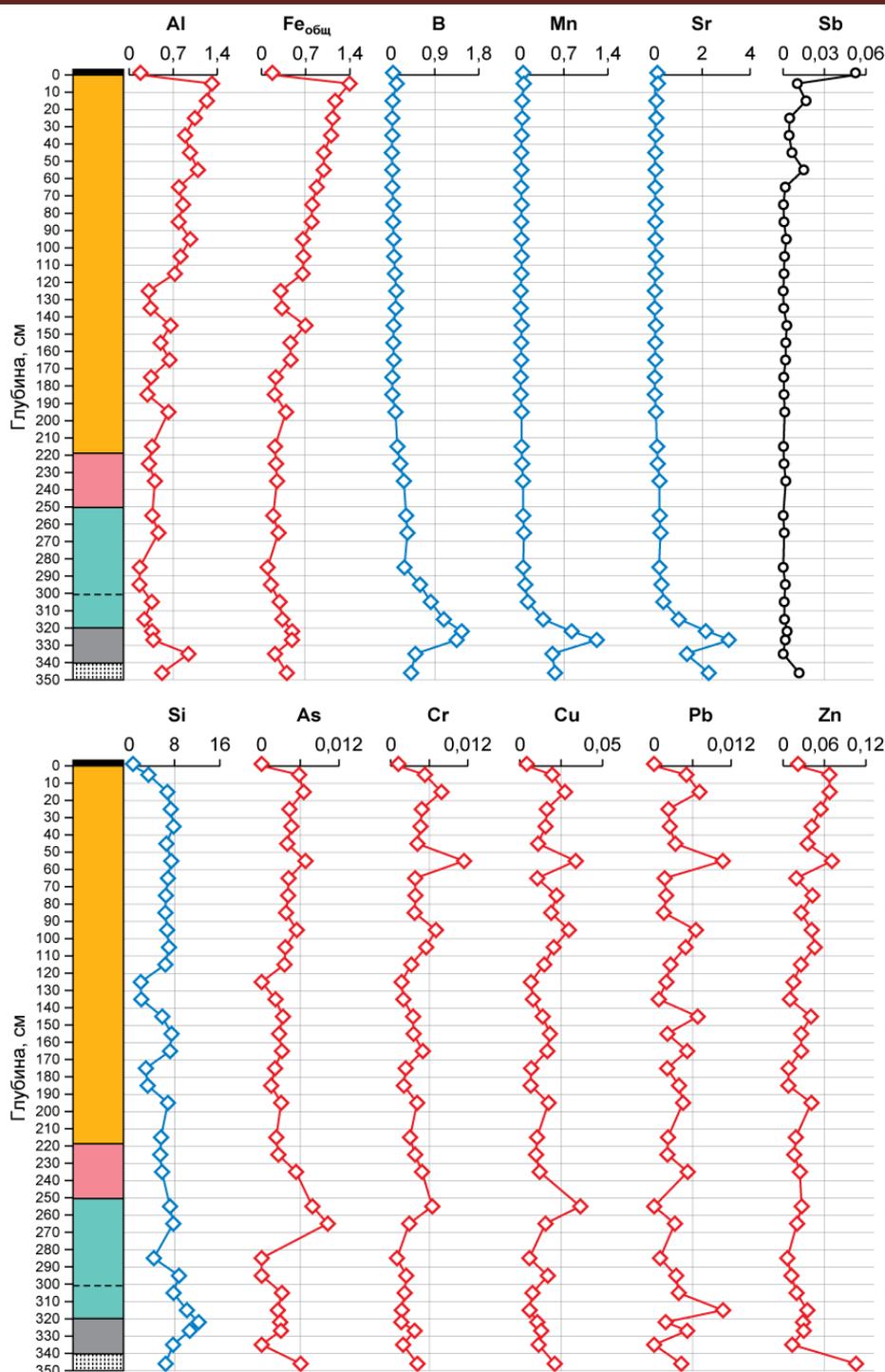


Рисунок 4. Распределение растворенных химических элементов (мг/л) по профилю торфа. Стратиграфическая колонка – см. рис. 3.

Группа Al и Fe_{общ} характеризуется высокими концентрациями в верховом торфе и тенденцией снижения в более глубоких слоях торфяника, что подтверждается их сильной положительной корреляцией ($r = 0,89$; $p\text{-value} < 0,05$ – здесь и далее). Для Al характерна низкая концентрация (0,18 мг/л) в болотных водах оёса, которая резко возрастает в верховом торфе (5–220 см), где среднее значение составляет 0,74 мг/л (максимум 1,32 мг/л на глубине 5 см). В переходном торфе (220–250 см) средняя концентрация падает до 0,39 мг/л, в низинном (285–315 см) – до 0,23 мг/л, с небольшим увеличением в минеральных отложениях (322–350 см) до среднего 0,55 мг/л (максимум 0,94 мг/л на глубине 335 см). Аналогично Al, для Fe_{общ} минимальная концентрация установлена в оёсе (0,17 мг/л) с пиком в верховом торфе (среднее 0,69 мг/л, максимум 1,40 мг/л на 5 см). Далее следует снижение: в переходном торфе – 0,23 мг/л, в низинном – 0,21 мг/л с умеренным ростом в минеральных отложениях (среднее 0,39 мг/л, максимум 0,48 мг/л на глубине 327 см). Таким образом, для Fe_{общ} и Al максимальные их

концентрации установлены в самом верхнем, приповерхностном слое торфяника, так называемом деятельном слое.

Элементы В, Мп и Sr, демонстрирующие заметное увеличение с глубиной образуют вторую группу. Элементы этой группы показывают прогрессивный рост концентраций от поверхности к минеральным отложениям с сильными положительными корреляциями между В, Мп и Sr ($r = 0,83-0,98$), а также умеренной с Si (0,55–0,66). Так, минимальные значения В установлены в оёсе (0,05 мг/л) и в верховом торфе (среднее – 0,06 мг/л) с заметным ростом в переходном торфе (0,28 мг/л, максимум 0,34 мг/л на глубине 255 см). В низинном торфе отмечается резкое увеличение концентраций, где средние значения составили 0,69 мг/л с максимумом 1,08 мг/л в высокозольном слое на глубине 315 см, а в минеральных отложениях еще больше – 0,93 мг/л (максимум 1,45 мг/л на глубине 322 см). Марганец имеет следующие концентрации: оёс – 0,05 мг/л, верховой торф – 0,02, переходный торф – 0,05 мг/л. Значительное увеличение концентраций Мп наблюдается в низинном торфе – 0,16 мг/л (максимум 0,37 мг/л на глубине 315 см) и минеральных отложениях – 0,78 мг/л (максимум 1,22 мг/л на глубине 327 см). Для Sr также установлены низкие средние концентрации в оёсе (0,01 мг/л) и в верховом торфе (0,04 мг/л), с последующим ростом в переходном торфе (0,22 мг/л, максимум 0,27 мг/л на глубине 255 см). В низинном торфе средние значения Sr составляют 0,50 мг/л (максимум 1,07 мг/л на глубине 315 см), а в минеральных отложениях – 2,24 мг/л (максимум 3,16 мг/л на глубине 327 см).

Кремний имеет некоторую схожесть по распределению с группой 2, однако в характере поведения Si менее выражен тренд на резкое увеличение в нижних интервалах торфа и минеральных отложениях. Низкая концентрация Si наблюдается в болотных водах оёса (0,69 мг/л), с ростом в верховом торфе (среднее 5,82 мг/л, максимум 7,81 мг/л на глубине 35 см). Глубже по разрезу установлено дальнейшее увеличение: переходный торф – 6,55 мг/л, низинный торф – 7,78 (максимум 10,19 мг/л на глубине 315 см), минеральные отложения – 9,26 мг/л (максимум 12,24 мг/л на глубине 322 см).

Третья группа элементов с неоднозначным или слабо выраженным трендом распределения – As, Cr, Cu, Pb, Zn (частично сюда можно отнести и Si). Эти элементы имеют низкие концентрации (часто <0,01 мг/л), с умеренными корреляциями между собой (0,3–0,7) и с первой группой (Al, Fe). Мышьяк не обнаружен в болотных водах оёса, в верховом торфе среднее содержание составляет 0,004 мг/л (максимум 0,007 мг/л на глубине 55 см), а пик As наблюдается в переходном торфе (0,006 мг/л, максимум 0,01 мг/л на глубине 255 см). Глубже по разрезу концентрация As снижается до 0,001 мг/л в низинном торфе и 0,003 мг/л в минеральных отложениях. Для Cr установлены низкие концентрации в оёсе (0,001 мг/л), средние (0,004 мг/л) – в верховом и переходном торфе (максимум 0,011 мг/л на глубине 55 см). Далее наблюдается снижение концентраций Cr в низинном торфе (0,002 мг/л) и минеральных отложениях (0,003 мг/л). В распределении Cu установлены низкие концентрации в оёсе (0,004 мг/л), средние (0,016–0,018 мг/л) – в верховом и переходном торфе (максимум 0,037 мг/л на глубине 255 см). Далее наблюдается снижение концентрации Cu в низинном торфе (0,009 мг/л) и умеренное содержание в минеральных отложениях (0,014 мг/л). Свинец не обнаружен в болотных водах оёса, в верховом и низинном торфе его средняя концентрация составляет 0,004 мг/л (максимум 0,011 мг/л на глубине 315 см), с некоторым снижением в переходном торфе (0,003 мг/л) и минеральных отложениях (0,003 мг/л). Для Zn среднее содержание в оёсе и верховом торфе составляет 0,02–0,03 мг/л, с максимумом 0,07 мг/л на глубине 55 см, при дальнейшем снижении концентрации в переходном и низинном торфе (0,02–0,018 мг/л) и ее росте в минеральных отложениях (0,04 мг/л, максимум 0,11 мг/л на глубине 350 см).

Сурьма демонстрирует уникальный, самостоятельный тренд, отличный от всех других изученных элементов. Так, для Sb наблюдается четкий максимум концентрации (0,053 мг/л) в болотных водах оёса и приповерхностных слоях верхового торфа (0,010–0,017 мг/л). Глубже по разрезу концентрация Sb резко падает (на порядок) и остается довольно низкой.

Аутигенные минералы железа. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в материале торфа был обнаружен ряд аутигенных минералов Fe, сменяющих друг друга вниз по разрезу (рис. 5). Так, в самых верхних интервалах торфяника (10–15 см) были установлены псевдоморфозы окси-гидроксидов Fe на поверхности оторфованных частей растений, а в нижних интервалах торфа (300–305 см) – единичные находки скоплений кристаллов и отдельных фрамбоидов пирита. Спектр рассеивания энергии первого образца (рис. 5 А) показывает присутствие в его составе Fe (60,31), O (34,54 мас. %) и небольшое количества Mn (1,04 мас. %), который согласно (Mineralogy Database) близок по составу к гётиту: Fe (62,85), H (1,13), O (36,01 мас. %). Спектр рассеивания энергии второго образца (рис. 5 Б) показывает присутствие в его составе Fe (44,36), S (48,92 мас. %), что согласно (Mineralogy Database) близко по составу к пириту: Fe (46,55), S (53,45 мас. %).

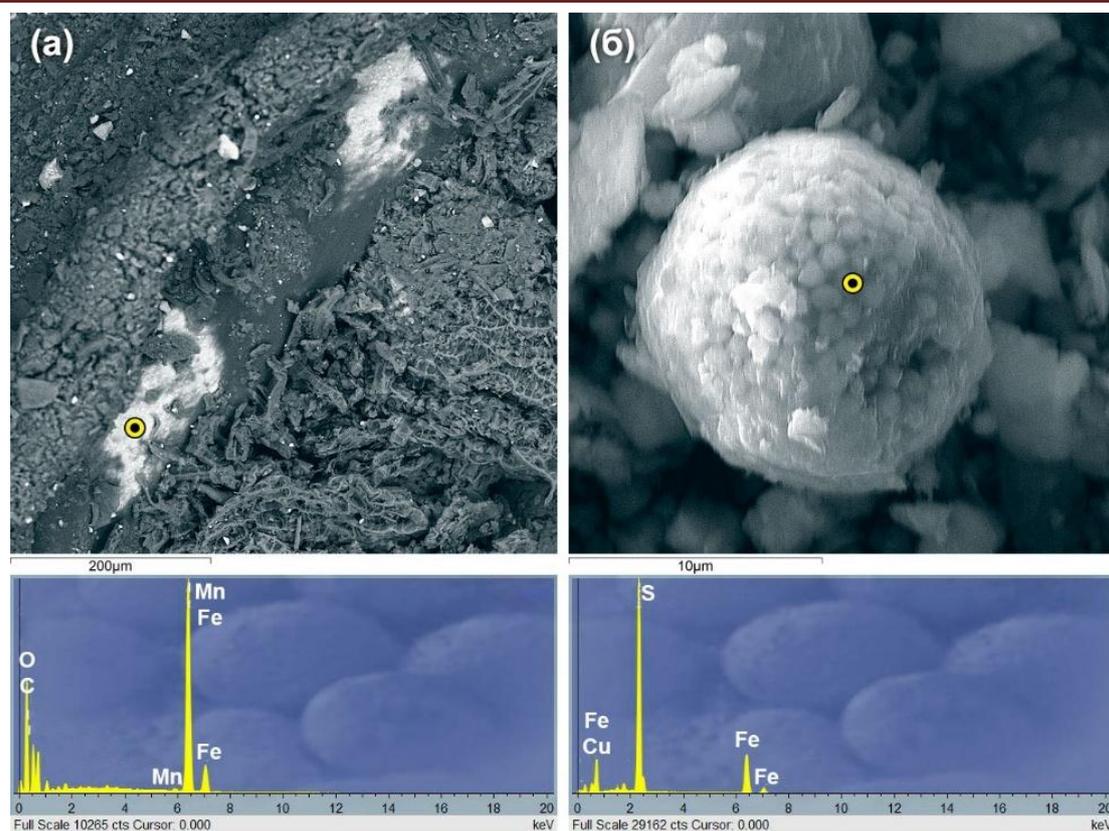


Рисунок 5. Микрофотографии аутигенных минералов железа и их энергодисперсионные спектры: а) гидроксиды Fe (III) из интервала 10–15 см, б) фрамбоидальный пирит из интервала 300–305 см.

ОБСУЖДЕНИЕ

В характере распределения ряда гидрохимических показателей (рН, Eh, РНУ, HCO_3^- и др.) и растворенных химических элементов по разрезу Большого Убинского яра можно выделить закономерности, связанные со сменой источников водного питания в процессе торфонакопления и, соответственно, сменой типа торфа. Рост содержания в болотных водах низинного торфа суммы растворенных солей ($\Sigma\text{и}$), концентраций Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si и ряда микроэлементов (B, Mn, Sr), а также значений рН – является следствием формирования болота в условиях богатого минерального питания (табл. 1, рис. 3, 4). Близость залегания подстилающих пород, разрушение ряда минералов и фильтрация грунтовых вод через подошвенный горизонт залежи приводит к повышению значений рН, концентрации, как основных катионов, так и микроэлементов. В низинном торфе наблюдается резкое увеличение концентраций Ca^{2+} и Mg^{2+} (до 177,22 и 111,11 мг/л, соответственно), что свидетельствует о влиянии минерализованных грунтовых вод. Чрезвычайно сильная положительная корреляция между парой этих ионов указывает на их общий источник поступления в болотные воды, скорее всего, за счет выщелачивания минералов грунтовыми водами из подстилающих пород. Концентрации Na^+ и K^+ также возрастают, достигая 34,17 и 11,81 мг/л, соответственно, что подтверждает влияние минерального питания на формирование химического состава болотных вод низинных торфов.

Заметный рост концентраций Sr, Mn и B на границе высокозольного низинного торфа и ОМО является следствием контакта торфа с минеральным дном болота. Марганец активно переходит в раствор в восстановительных условиях среды, характерных для низинного минерализованного торфа и подстилающих пород, которая определяет поведение данного элемента в профиле торфяника, т.к. марганец наиболее чувствительный к смене значений Eh (Ефремова и др., 2003). Высокие концентрации бора и стронция являются «классическим» маркером поступления высокоминерализованных грунтовых вод, а также отражением процессов выщелачивания алевритово-глинистых минералов, слагающих ложе болота. Помимо этого, увеличение содержания растворенных Sr, Mn и B (на фоне роста Ca^{2+} и Mg^{2+}), по-видимому, связано с карбонатным геохимическим барьером: растворением и/или разрушением карбонатных минералов. Присутствие аутигенных карбонатов на этих глубинах подтверждают данные СЭМ. В этой зоне также фиксируются максимальные значения содержания сероводорода при одновременном снижении содержания сульфатов и РОУ, что может

указывать на протекание процессов бактериальной сульфатредукции, которая подтверждается сильной обратной корреляцией $r = -0,72$ (табл. 2): сульфаты потребляются микроорганизмами с образованием сероводорода и сульфидов железа. Активные процессы бактериальной сульфатредукции существенно влияют на изменение карбонатно-кальциевого равновесия (Гранина, 2008; Леонова и др., 2022б).

Таблица 2

Матрица корреляции ключевых пар ионов / параметров со статистически значимыми коэффициентами (p -value $< 0,05$) и их геохимическая интерпретация

Пара ионов / параметров	Коэффициент корреляции (r)	Геохимическая интерпретация
$\text{NH}_4^+ - \text{H}_2\text{S}$	+0,92	Продукты анаэробного разложения органического вещества; их совместное накопление в восстановительной зоне подтверждается очень сильной положительной корреляцией.
$\text{NH}_4^+ - \text{HCO}_3^-$	+0,88	Данная группа ионов является маркером изменения значений pH, а также изменения окислительно-восстановительных условий (частично).
$\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$	+0,98	Подтверждает общий источник поступления, скорее всего, за счет выщелачивания из минеральных отложений грунтовыми водами в нижней части разреза и/или растворения карбонатных минералов.
$\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{S}$	-0,72	Сильная обратная корреляция подтверждает наличие процесса бактериальной сульфатредукции.
$\text{SO}_4^{2-} - \text{PO}_4$	+0,74	Показывает потребление PO_4 в процессе сульфатредукции.
$\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$	+0,65	Может косвенно указывать на совместный источник поступления с минерализованными грунтовыми водами из подстилающих пород.
$\text{NO}_3^- - \text{Глубина}$	-0,55	Подтверждает наличие окислительно-восстановительного геохимического барьера: содержание нитратов падает с глубиной по мере снижения окислительных условий среды.
$\text{NO}_3^- - \text{PO}_4$	+0,85	Указывает на процессы деструкции OB ; в частности, подтверждает рост степени минерализации органики в низинном торфе.
$\text{K}^+ - \text{PO}_4$	+0,78	Калий и фосфат часто являются биогенными элементами, высвобождающимися при разложении растительных остатков; их сильная положительная корреляция указывает на общий механизм поступления в болотные воды.
$\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$	+0,81	Сильная прямая корреляция указывает на приток минерализованных грунтовых вод в нижних интервалах торфяника.
$\text{H}_2\text{S} - \text{Глубина}$	+0,85	Показывает, что концентрация сероводорода достоверно увеличивается с глубиной и является ключевым индикатором формирования восстановительной обстановки.

По мере торфонакопления связь с подстилающими породами постепенно ослабевает и происходит некоторое снижение минерализации, концентраций HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} и ряда химических элементов, со значительными изменениями в ионном составе болотных вод. Высокие концентрации аммония (до 12 мг/л) свидетельствуют о развитии восстановительных условий среды, а рост содержания сульфатов (до 20,24 мг/л) и PO_4 (до 124,2 мг/л), отражает снижение (или полное прекращение) интенсивности процессов бактериальной сульфатредукции. Резкое изменение Eh, РНУ, Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , As, Cr и Cu наблюдается на глубине 260–280 см, что, по-видимому, маркирует положение постоянного стояния уровня грунтовых вод и границу между «активной», окислительной и «инертной», восстановительной частями торфяной залежи. Заметное увеличение концентраций Cl^- (до 11,44 мг/л) в слое переходного пушицево-гипсового торфа (220–250 см), который неоднократно горел в прошлом, возможно, как-то связано с влиянием палеопожаров. В то же время, поскольку аномалия не сопровождается значимым ростом других ионов и микроэлементов, это предположение требует дополнительных исследований.

Переход болота на олиготрофную стадию приводит к полному исчезновению в составе болотных вод HCO_3^- и РНУ на фоне заметного снижения значений pH и росте Eh, со значительными изменениями в ионном составе болотных вод; это выражается в закономерном снижении минерализации и концентраций Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , что характерно для верховых болот и их естественного развития. Происходит смена восстановительно-щелочного геохимического барьера низинного торфа на кислотный (pH = 3,57–3,95), окислительный (Eh = +301...+410 мВ), который также влияет на характер распределения ионов и элементов. Помимо этого, переход болота на олиготрофную

стадию развития привел к продолжительному минимуму зольности в диапазоне от 20 до 220 см (рис. 2), что связано с питанием болота лишь слабоминерализованными атмосферными водами. Особенностью рямов Барабы является резкий переход на олиготрофную сфагновую стадию развития, что свидетельствует о влиянии мощного внешнего фактора – температурного (Прейс и др., 2022). Данный фактор обусловил сначала, в период похолодания климата, формирование **многолетнемерзлого (ММ)** водоупора, изолирующего влияние богатых грунтовых вод, а после прекращения его влияния, в период последующего потепления, наличие слабоминерализованной верховодки над деградирующим ММ слоем торфа, что способствовало активной трансгрессии олиготрофных сфагновых мхов. Судя по блоковой стратиграфии, резкой границе между торфяными отложениями олиготрофных рямов и окружающих их эвтрофных осоково-тростниковых займищ, этот фактор был кратковременным и очаговым. Поэтому олиготрофизация происходила лишь на этих очагах и, в связи с отсутствием условий для распространения олиготрофных сфагновых мхов на окружающей площади, рямы, по мере отложения торфов, быстро приобрели выпуклую форму, что исключило влияние других источников водного питания, кроме атмосферного.

В иной геохимической обстановке происходит формирование верхового торфа у кровли. В условиях существенного снижения минерального питания, указывающего на естественный ход торфонакопления в позднем голоцене, отмечаются относительно низкие концентрации большинства ионов. Концентрации основных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) в этом интервале варьируют в пределах 1,35–8,13 мг/л без выраженного тренда, демонстрируя доминирующее влияние атмосферного питания на характер формирования болотных вод. Рост вклада атмосферного питания подтверждает увеличение доли Cr, Cu, Pb, Zn в составе болотных вод. Для верхового торфа характерны повышенные содержания нитратов (до 1,29 мг/л) при минимальных значениях растворенного сероводорода ($<0,031$ мг/л), что является следствием окислительных условий среды и прекращения процессов сульфатредукции.

Резкая смена окислительно-восстановительных условий и pH приводит к заметному росту концентрации растворенных Fe и Al. Так, в условиях повышенной кислотности верховых торфов Fe и Al становятся подвижными и способны легко переходить в состав болотных вод из твердой фазы. Сильная положительная корреляция между Al и Fe может указывать на их совместную мобилизацию при участии фульвокислот и гуминовых веществ, которые образуют растворимые металлоорганические комплексы (Шварцев и др., 2012; Леонова и др., 2022б). Также органическое вещество играет большую роль в разрушении структур алюмосиликатных минералов и выносе алюминия (Helmer et al., 1990). Изменение окислительно-восстановительных условий среды вниз по разрезу залежи торфа приводит к смене ассоциаций минеральных новообразований Fe (рис. 5). Верховые торфа характеризуются развитием оксидов и гидроксидов железа, в то время как в низинной части залежи их доля снижается и появляются сульфиды Fe (пирит), что характерно для низинного торфа (Лукашев и др., 1971).

Болотные воды, пронизывающие живой сфагновый мох (очёс), имеют максимальные концентрации Sb (на фоне снижения ряда химических элементов), что может быть обусловлено фактором воздушной миграции, т.е. данный элемент связан с антропогенным воздействием на болотную экосистему в XX и XXI веках. Высокое содержание Sb на фоне снижения концентраций ряда других «антропогенных» элементов (As, Cr, Cu, Pb) может свидетельствовать об активном выщелачивании Sb из торфа в болотную воду очёса. Такое распределение позволяет предположить биофильность сурьмы и ее активное поглощение живой растительностью (мхом) из атмосферных выпадений с последующим выщелачиванием при отмирании сфагнума.

В целом, болотная вода, отобранная непосредственно из очёса, демонстрирует принципиально иной характер распределения ряда растворенных элементов по сравнению с нижележащими горизонтами верхового торфа (5–25 см), что позволяет выделить его в самостоятельную зону. Эта зона работает как «буферный» геохимический барьер, который регулирует поступление химических элементов в нижележащую торфяную толщу. Заметное различие концентрации большинства ионов (Cl^- , HCO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и элементов (Al, Fe, Si, Zn) между очесом и деятельным слоем торфа маркирует границу между «современной» биогеохимической системой и собственно торфяной залежью, где ведущую роль играют процессы раннего диагенеза и выщелачивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о формировании в торфяной залежи Большого Убинского рьяма двух контрастных геохимических барьеров: 1) кислотно-окислительного в верхней части разреза и 2) восстановительно-щелочного в нижней части. Резкое изменение всех параметров на глубине 260–

280 см, по-видимому, маркирует положение постоянного стояния уровня грунтовых вод и границу между «активной» окислительной и «инертной» восстановительной частями торфяной залежи.

Наблюдается ярко выраженное увеличение общей минерализации с глубиной, что является следствием смены типа болотных вод от слабоминерализованных в активном слое торфа к минерализованным грунтовым водам в низинной части болотной залежи. Резкий скачок минерализации ниже отметки 200 см является важной гидрохимической границей в разрезе Большого Убинского рьяма.

Выявлены четкие закономерности в распределении основных ионов по глубине торфяной залежи, которые демонстрируют выраженную вертикальную зональность, отражающую изменение физико-химических условий. Для очёса и верхового торфа отмечаются относительно низкие концентрации большинства ионов (что связано с преимущественно атмосферным питанием рьяма), а в зоне высокозольного низинного торфа и ОМО фиксируются максимальные значения сероводорода при одновременном снижении содержания сульфатов и РОУ, что может указывать на активное протекание процессов бактериальной сульфатредукции.

Распределение макро- и микроэлементов в болотных водах формируется под влиянием двух основных факторов: 1) градиента окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий по глубине торфяной залежи и 2) литологического состава подстилающих отложений, выступающего как дополнительный источник химических элементов. Выделенные геохимические группы (1. Al, Fe_{общ}; 2. B, Mn, Si, Sr; 3. As, Cr, Cu, Pb, Zn) наглядно отражают разные миграционные способности элементов и их отклик на изменение условий торфонакопления в голоцене, что подчеркивает переход от олиготрофных к эвтрофным условиям.

Вниз по разрезу торфяника происходит смена ассоциаций аутигенных минеральных фаз железа, что связано с изменением окислительно-восстановительных условий среды. Олиготрофная толща характеризуется развитием оксидов и гидроксидов Fe, а эвтрофная часть торфяной залежи – присутствием сульфидов Fe (пирит).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны сотрудникам ИГМ СО РАН: канд. геол.-минерал. наук М.С. Мельгунову и В.А. Ходько за помощь в отборе образцов торфа. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и уточнения.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 24-27-00061.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция и железа в вертикальном профиле торфяных залежей таёжной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2013. Том 323. № 1. С. 173–178.
- Бахнов В.К. Содержание микроэлементов меди и марганца в торфяных почвах Барабинской низменности. Микроэлементы в почвах, растениях и водах южной части Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1971. С. 17–27.
- Бахнов В.К. Медь и марганец в болотных почвах Барабы и влияние микроудобрений на урожай зерновых культур, возделываемых на этих почвах. Генетические особенности и вопросы плодородия почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1972. С. 194–211.
- Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск: Наука Сиб. отд-ние, 1986. 193 с.
- Бобров В.А., Прейс Ю.И., Будашкина В.В. Оценка потоков минерального вещества из атмосферы на основе микроэлементного состава торфяной залежи верхового болота Бакчар-1 (южная тайга Западной Сибири) // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2013. Том 22. № 1. С. 20–29.
- Валуцкий В.И. Лесостепные рьямы Восточной Барабы как объекты охраны природы. Москва: Деп. в ВИНТИ № 2448-В91, 1991. 23 с.
- Веретенникова Е.Э. Содержание и распределение химических элементов в торфах южно-таежной подзоны Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 89–95.

- Веретенникова Е.Э., Курьина И.В., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Смирнов С.В. Геохимические особенности торфяных залежей олиготрофных болот южно-таежной зоны Западной Сибири // Геохимия. 2021. Том 66. № 6. С. 562–576. <https://doi.org/10.31857/S0016752521050095>
- Водяницкий Ю.Н., Гребенкин Н.А., Манахов Д.В., Сащенко А.В., Тюленева В.М. Положительные аномалии содержания урана в торфяниках гумидной зоны (обзор) // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1492–1501. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1912013X>
- Волков И.И., Жабина Н.Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках. Химический анализ морских осадков. Москва: Наука, 1980. С. 5–27.
- Гранина Л.З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. 156 с.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Куценогий К.П., Онучин А.А., Переседов В.Ф. Биогеохимия Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U в низинном торфянике на междуречье Оби и Томи // Почвоведение. 2003. № 5. С. 557–567.
- Иванова Е.С., Харанжевская Ю.А., Миронов А.А. Латеральное распределение и миграция химических элементов в водах болот бассейнов рек Бакчар и Икса (Западная Сибирь) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 4. С. 55–64.
- Инишева Л.И., Инишев Н.Г. Водная миграция химических элементов в системе геохимически сопряженных олиготрофных ландшафтов с потоком поверхностно-болотных вод // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: материалы Всероссийской конференции. Томск: Изд. НТЛ, 2000. С. 204–208.
- Инишева Л.И., Инишев Н.Г. Элементы водного баланса и гидрохимическая характеристика олиготрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири // Водные ресурсы. 2001. Том 28. № 4. С. 410–417.
- Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Прейс Ю.И., Бобров В.А. Геоэкологическая оценка современного состояния верховых болот (рямов) Барабинской лесостепи в условиях антропогенного воздействия // Геосферные исследования. 2022а. № 4. С. 76–95. <https://doi.org/10.17223/25421379/25/5>
- Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Айсуюева Т.С., Бобров В.А., Меленевский В.Н., Бычинский В.А., Мирошниченко Л.В. Геохимия раннего диагенеза болотных отложений на примере голоценового разреза торфяника Дулиха (Восточное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2022б. Том 63. № 6. С. 830–850. <https://doi.org/10.15372/GiG2021114>
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукa З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Гриф и Ко: Тула, 2001. 584 с.
- Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 318 с.
- Лукашев К.И., Ковалев В.А., Жуховицкая А.Л., Хомич А.А., Генералова В.А. Геохимия озерно-болотного литогенеза. Минск: Наука и техника, 1971. 280 с.
- Прейс Ю.И., Леонова Г.А., Мальцев А.Е. Стратиграфия и динамика аккумуляции торфа и углерода на рьямах Барабинской лесостепи в голоцене (Западная Сибирь) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2022. Том 49. № 1. С. 36–48. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2022-1-36-47>
- Савичев О.Г. Химический состав болотных вод территории Томской области (Западная Сибирь) и их взаимодействие с минеральными и органоминеральными соединениями // Известия Томского политехнического университета. 2009. Том 314. № 1. С. 72–77.
- Савичев О.Г. Распространение неорганических загрязняющих веществ по глубине верховой торфяной залежи // Сибирский экологический журнал. 2015. Том. 22. № 1. С. 145–153.
- Савичев О.Г., Шмаков А.В. Вертикальная зональность и внутригодовые изменения химического состава вод Тимирязевского болота (Томск, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. 2012. Том 320. № 1. С. 156–161.
- Савичев О.Г., Гусева Н.В., Куприянова Е.А., Скороходова А.А., Ахмед-Оглы К.В. Химический состав вод Обского болота (Западная Сибирь) и его пространственные изменения под влиянием сбросов загрязняющих веществ // Известия Томского политехнического университета. 2013. Том. 323. № 1. С. 168–172.
- Савичев О.Г., Мазуров А.К., Рудмин М.А., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Механизмы концентрирования химических элементов в торфяной залежи в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // Доклады Академии наук. 2019а. Том. 486. № 3. С. 350–353. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863350-353>

- Савичев О.Г., Наливайко Н.Г., Рудмин М.А., Мазуров А.К. Микробиологические условия распределения химических элементов по глубине торфяной залежи в экосистемах восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Том 330. № 9. С. 184–194. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2272>
- Скороходова А.А., Савичев О.Г. Содержания и формы миграции меди и цинка в природных водах Васюганского болота // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 368. С. 166–172.
- Харанжевская Ю.А., Иванова Е.С., Воистинова Е.С. Многолетняя динамика содержания гуминовых веществ в водах осушенного верхового болота в Западной Сибири // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 19–36. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-1-2>
- Шварцев С.Л. Геохимия природных вод района Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Под общ. ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд. Института оптики атмосферы, 2002. С. 139–149.
- Шварцев С.Л., Серебренникова О.В., Здвижков М.А., Савичев О.Г., Наймушина О.С. Геохимия болотных вод нижней части бассейна Томи (юг Томской области) // Геохимия. 2012. № 4. С. 403–417.
- Goldstein G.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Fiori C., Lifshin E. Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. New York: Plenum Press, 1981. 235 p.
- Gorham E., Janssens J.A. The distribution and accumulation of chemical elements in five peat cores from the mid-continent to the eastern coast of North America // Wetlands. 2005. Vol. 25. № 2. P. 259–278. <https://doi.org/10.1672/3>
- Griffiths N.A., Sebestyen S.D., Oleheiser K.C. Variation in peatland porewater chemistry over time and space along a bog to fen gradient // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 697. P. 134152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134152>
- Helmer E.H., Urban N.R., Eisenreich S.J. Aluminum geochemistry in peatland waters // Biogeochemistry. 1990. Vol. 9. No. 3. P. 247–276. <https://doi.org/10.1007/BF00000601>
- Kempton H., Krachlera M., Shotyky W., Zaccone C. Major and trace elements in Sphagnum moss from four southern German bogs, and comparison with available moss monitoring data // Ecological Indicators. 2017. Vol. 78. P. 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.029>
- Malawska M., Wilkomirski B. Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east of Poland) // Soil science and plant nutrition. 2004. Vol. 50. No. 6. P. 925–930. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408555>
- Mineralogy Database [Электронный ресурс]. URL: <https://www.webmineral.com> (дата обращения 27.08.2025).
- Rudmin M., Ruban A., Savichev O., Mazurov A., Dauletova A., Savinova O. Authigenic and Detrital Minerals in Peat Environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia // Minerals. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 500. <https://doi.org/10.3390/min8110500>
- Shotyky W., Weiss D., Kramers J.D., Frei R., Cheburkin A.K., Gloor M., Reese S. Geochemistry of the peat bog at Etang de la Gruère, Jura Mountains, Switzerland, and its record of atmospheric Pb and lithogenic trace metals (Sc, Ti, Y, Zr, and REE) since 12,370 14C yr BP // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2001. Vol. 65. No. 14. P. 2337–2360. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00586-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00586-5)
- Stanton M.R., Yager D.B., Fey D.L., Wright W.G. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits (Eds. Church S.E., Guerard P., Finger S.E.). San Juan County, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 1651, 2007. P. 689–720.
- Steinmann P., Shotyky W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland) // Chemical Geology. 1997. Vol. 138. № 1-2. P. 25–53. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00171-4)
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 53. P. 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>

Поступила в редакцию 31.08.2025

Принята 14.10.2025

Опубликована 31.10.2025

Сведения об авторах:

Мальцев Антон Евгеньевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ФГБУН Институт

геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск, Россия); maltsev@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5847-3180>

Прейс Юлия Ивановна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); preisyui53@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8524-8797>

Леонова Галина Александровна – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск, Россия); leonova@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5127-7083>

Ломова Александра Андреевна – инженер-исследователь лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск, Россия); lomovaaa@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0009-0006-1461-2755>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Geochemistry of peatland water in the holocene sequence of the Bolshoy Ubinsky ryam (Baraba forest-steppe)

© 2025 A. E. Maltsev ¹, Yu. I. Preis ², G. A. Leonova ¹, A. A. Lomova ¹

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademika Koptyuga Ave., 3, Novosibirsk, Russia. E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskyy Ave., 10, Tomsk, Russia. E-mail: preisyui@rambler.ru

The aim of the study was to investigate the chemical composition and formation patterns of peatland water in the Bolshoy Ubinsky Ryam during the Holocene.

Location and time of the study. The study focused on peatland water from the Bolshoy Ubinsky Ryam, located in the forest-steppe zone in the south of West Siberia, at the southern boundary of the Baraba Lowland. Water sampling was conducted in September 2024.

Methods. The ionic composition of peatland water was determined using titrimetry, capillary electrophoresis, and photometry. Concentrations of Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Si, As, Cr, Cu, Pb, Zn, B, Mn, Sr, and Sb were measured by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). Concentrations of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved nitrogen (DN) were determined using a Multi N/C 2100S analyzer. Authigenic iron minerals were detected using a TESCAN MIRA 3 LMU scanning electron microscope equipped with microanalysis systems.

Results. For the first time, the chemical composition of peatland water throughout the sequence of peat deposits was obtained for the Bolshoy Ubinsky Ryam. The concentration of most major ions and chemical elements decreased from the fen peat types to transitional and bog peats, the latter receiving their hydro-mineral nutrition solely by atmospheric aerosols and the ash fraction after mineralization of plant biomass. The proximity of the underlying bedrock, reducing environmental conditions, as well as the dissolution of certain minerals and filtration of groundwater through the basal horizon of the peat deposit, led to the increased concentrations of Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Si, B, Mn, and Sr in the waters of fen peats. Compared to fen and transitional peats, the water of bog peats exhibited higher contents of Al, Fe, and Sb. A down-profile shift in the associations of authigenic iron mineral phases was observed: bog peats were characterized by the prevalence of oxides and hydroxides, whereas the fen part of the peat deposit was characterized by the presence of Fe sulfides (pyrite).

Conclusions. The obtained data convincingly demonstrate that the vertical geochemical zonation of peatland waters is directly determined by the genetic type of peat and the lithology of the underlying mineral deposits.

Keywords: peatland waters; ryam; geochemistry; dissolved organic matter; microelements; authigenic Fe minerals; Baraba forest-steppe.

How to cite: Maltsev A.E., Preis Yu.I., Leonova G.A., Lomova A.A. Geochemistry of peatland waters in the holocene sequence of the Bolshoy Ubinsky ryam (Baraba forest-steppe). *The Journal of Soils and Environment*. 2025. 8(4). e332. DOI: [10.31251/pos.v8i4.332](https://doi.org/10.31251/pos.v8i4.332) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the staff of the IGM SB RAS: Cand. Sci. (Geol.-Min.) Melgunov M.S. and Khodko V.A. for their assistance in peat samples collection.

FUNDING

This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), project no. 24-27-00061.

REFERENCES

- Arkhipov V.S., Bernatonis V.K. Distribution of calcium and iron in the vertical profile of peat deposits in the taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. Vol. 323. No. 1. P. 173–178. (in Russian).
- Bakhnov V.K. Content of trace elements copper and manganese in peat soils of the Baraba Lowland. In book: *Trace elements in soils, plants and waters of the southern part of Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1971. P. 17–27. (in Russian).
- Bakhnov V.K. Copper and manganese in swamp soils of Baraba and the effect of microfertilizers on the yield of cereal crops cultivated on these soils. In book: *Genetic features and issues of soil fertility in Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1972. P. 194–211. (in Russian).
- Bakhnov V.K. Biogeochemical aspects of the bog formation process. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1986. 193 p. (in Russian).
- Bobrov V.A., Preis Yu.I., Budashkina V.V. Assessment of mineral matter fluxes from the atmosphere based on the trace element composition of the peat deposit of the Bakchar-1 raised bog (southern taiga of Western Siberia). *Problems of Biogeochemistry and Geochemical Ecology*. 2013. Vol. 22. No. 1. P. 20–29. (in Russian).
- Valutsky V.I. Forest-steppe ryams of Eastern Baraba as objects of nature conservation. Moscow: Dep. in VINITI No. 2448-V91, 1991. 23 p. (in Russian).
- Veretennikova E.E. Content and distribution of chemical elements in peats of the southern taiga subzone of Western Siberia. *Geografia i prirodnye resursy*. 2013. No. 2. P. 89–95. (in Russian).
- Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical Features of Peat Deposits at Oligotrophic Bogs in the Southern Taiga Subzone of West Siberia. *Geochemistry International*. 2021. Vol. 59. No. 6. P. 618–631. <https://doi.org/10.1134/S0016702921050098>
- Vodyanitskii Y.N., Grebenkin N.A., Manakhov D.V., Sashchenko A.V., Tyuleneva V.M. Positive anomalies of uranium content in peatlands of the humid zone: A Review. *Eurasian Soil Science*. 2019. No. 52. No. 12. P. 1533–1541. <https://doi.org/10.1134/S1064229319120135>
- Volkov I.I., Zhabina N.N. Methods for determining various sulfur compounds in marine sediments. In book: *Chemical Analysis of Marine Sediments*. Moscow: Nauka Publ., 1980. P. 5–27. (in Russian).
- Granina L.Z. Early diagenesis of bottom sediments of Lake Baikal. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2008. 156 p. (in Russian).
- Efremova T.T., Efremov S.P., Onuchin A.A., Kutsenogii K.P., Peresedov V.F. Biogeochemistry of Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U in a low moor peat deposit of the Ob'-Tom' Interfluve. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No. 5. P. 501–510.
- Ivanova E.S., Kharanzhevskaya Yu.A., Mironov A.A. Lateral distribution and migration of chemical elements in swamp waters within the Bakchar and Ikxa river basins (Western Siberia). *Lomonosov Geography Journal*. 2017. No. 4. P. 55–64. (in Russian).
- Inisheva L.I., Inishev N.G. Aquatic migration of chemical elements in the system of geochemically coupled oligotrophic landscapes with a flow of surface-bog waters. *Fundamental Problems of Water and Water Resources at the Turn of the Third Millennium: Proceedings of the All-Russian Conference*. Tomsk: NTL Publishing, 2000. P. 204–208. (in Russian).
- Inisheva L.I., Inishev N.G. Elements of water balance and hydrochemical characteristics of oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia. *Water Resources*. 2001. Vol. 28. No. 4. P. 371–377. <https://doi.org/10.1023/A:1010433319474>
- Leonova G.A., Maltsev A.E., Preys Yu.I., Bobrov V.A. Geocological assessment of the current state of upper bogs (ryams) of the Barabin forest-steppe under anthropogenic impact. *Geosphere Research*. 2022a. No. 4. P. 76–95. (in Russian).
- Leonova G.A., Maltsev A.E., Aysueva T.S., Bobrov V.A., Melenevsky V.N., Bychinsky V.A., Miroshnichenko L.V. Geochemistry of early diagenesis of bog deposits on the example of the Holocene section of the Dulikha peat bog (Eastern

- Baikal region). *Russian Geology and Geophysics*. 2022b. Vol. 63. No. 6. P. 689–705. <https://doi.org/10.2113/rgg20214314>
- 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. Bog Systems of Western Siberia and Their Environmental Significance. Tula: Grif i Ko, 2001. 584 p. (in Russian).
- Lishtvan I.I., Korol N.T. Basic Properties of Peat and Methods for Their Determination. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1975. 318 p. (in Russian).
- Lukashev K.I., Kovalev V.A., Zhukhovitskaya A.L., Khomich A.A., Generalova V.A. Geochemistry of Lake-Bog Lithogenesis. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1971. 280 p. (in Russian).
- Preys Yu.I., Leonova G.A., Maltsev A.E. Stratigraphy and dynamics of peat and carbon accumulation on the riams of the Baraba forest-steppe in the Holocene (West Siberia). *Geology and mineral resources of Siberia*. 2022. Vol. 49. No. 1. P. 36–48. (in Russian). <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2022-1-36-47>
- Savitchev O.G. Chemical composition of bog waters in the Tomsk region (Western Siberia) and their interaction with mineral and organomineral compounds. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2009. Vol. 314. No. 1. P. 72–77. (in Russian).
- Savichev O.G. Distribution of inorganic pollutants over the depth of upper peat deposit. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. Vol. 8. No. 1. P. 118–124. <https://doi.org/10.1134/S1995425515010114>
- Savitchev O.G., Shmakov A.V. Vertical zonality and intra-annual changes in the chemical composition of waters of the Timiryazevskoe bog (Tomsk, Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2012. Vol. 320. No. 1. P. 156–161. (in Russian).
- Savitchev O.G., Guseva N.V., Kupriyanova E.A., Skorokhodova A.A., Akhmed-Ogly K.V. Chemical composition of the waters of the Obskoe bog (Western Siberia) and its spatial changes under the influence of pollutant discharges. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. Vol. 323. No. 1. P. 168–172. (in Russian).
- Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Shakhova N.E., Semiletov I.P., Sergienko V.I. Mechanisms of accumulation of chemical elements in a peat deposit in the eastern part of Vasyugan swamp (West Siberia). *Doklady Earth Sciences*. 2019a. Vol. 486. No. 1. P. 568–570. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19050258>
- Savitchev O.G., Nalivaiko N.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K. Microbiological conditions of chemical elements distribution on peat deposit depth in ecosystems of the Vasyugan swamp east part (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019b. Vol. 330. No. 9. P. 184–194. (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/9/2272>
- Skorokhodova A.A., Savitchev O.G. Contents and migration forms of coPer and zinc in natural waters of the Vasyugan bog. *Tomsk State University Journal*. 2013. No. 368. P. 166–172. (in Russian).
- Kharanzhevskaya Yu.A., Ivanova E.S., Voistinova E.S. Many-year dynamics of humic substances content in the drained high bog waters in Western Siberia. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2017. No. 1. P. 19–36. (in Russian). <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-1-2>
- Shvartsev S.L. Geochemistry of natural waters in the region of the Great Vasyugan Mire. *The Great Vasyugan Mire. Current State and Development Processes*. Ed. by M.V. Kabanov. Tomsk: Publishing House of the Institute of Atmospheric Optics, 2002. P. 139–149. (in Russian).
- Shvartsev S.L., Zdvizhkov M.A., Serebrennikova O.V., Savichev O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, southern Tomsk oblast. *Geochemistry International*. 2012. Vol. 50. No. 4. P. 367–380. <https://doi.org/10.1134/S0016702912040076>
- Goldstein G.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Fiori C., Lifshin E. Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. New York: Plenum Press, 1981. 235 p.
- Gorham E., Janssens J.A. The distribution and accumulation of chemical elements in five peat cores from the mid-continent to the eastern coast of North America. *Wetlands*. 2005. Vol. 25. № 2. P. 259–278. <https://doi.org/10.1672/3>
- Griffiths N.A., Sebestyen S.D., Oleheiser K.C. Variation in peatland porewater chemistry over time and space along a bog to fen gradient. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 697. P. 134152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134152>
- Helmer E.H., Urban N.R., Eisenreich S.J. Aluminum geochemistry in peatland waters. *Biogeochemistry*. 1990. Vol. 9. No. 3. P. 247–276. <https://doi.org/10.1007/BF00000601>
- Kempton H., Krachlera M., Shotyky W., Zaccone C. Major and trace elements in Sphagnum moss from four southern German bogs, and comparison with available moss monitoring data. *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 78. P. 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.029>

Malawska M., Wilkomirski B. Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east of Poland). *Soil science and plant nutrition*. 2004. Vol. 50. No. 6. P. 925–930. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408555>

Mineralogy Database [Electronic resource]. URL: <https://www.webmineral.com> (on access 27.08.2025).

Rudmin M., Ruban A., Savichev O., Mazurov A., Dauletova A., Savinova O. Authigenic and Detrital Minerals in Peat Environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia. *Minerals*. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 500. <https://doi.org/10.3390/min8110500>

Shotyk W., Weiss D., Kramers J.D., Frei R., Cheburkin A.K., Gloor M., Reese S. Geochemistry of the peat bog at Etang de la Gruère, Jura Mountains, Switzerland, and its record of atmospheric Pb and lithogenic trace metals (Sc, Ti, Y, Zr, and REE) since 12,370 14C yr BP. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. Vol. 65. No. 14. P. 2337–2360. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00586-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00586-5)

Stanton M.R., Yager D.B., Fey D.L., Wright W.G. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits. Formation and Geochemical Significance of Iron Bog Deposits (Eds. Church S.E., Guerard P., Finger S.E.). San Juan County, Colorado: U.S. Geological Survey Professional Paper 1651, 2007. P. 689–720.

Steinmann P., Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland). *Chemical Geology*. 1997. Vol. 138. № 1-2. P. 25–53. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00171-4)

Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage. *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 53. P. 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.004>

Received 31 August 2025

Accepted 14 October 2025

Published 31 October 2025

About the authors:

Anton E. Maltsev – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry in the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); maltsev@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5847-3180>

Yuliya I. Preis – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Geoinformation Technologies in the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); preisyui53@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8524-8797>

Galina A. Leonova – Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry in the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); leonova@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5127-7083>

Alexandra A. Lomova – Research Engineer in the Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry in the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); lomovaaa@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0009-0006-1461-2755>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)