

Научная статья

УДК 550.424

doi: 10.17223/25421379/25/5

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ (РЯМОВ) БАРАБИНСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ



Галина Александровна Леонова¹, Антон Евгеньевич Мальцев²,
Юлия Ивановна Прейс³, Владислав Андреевич Бобров⁴

^{1, 2, 4} *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

³ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

¹ *leonova@igm.nsc.ru*

² *maltsev@igm.nsc.ru*

³ *preisyui@rambler.ru*

⁴ *bobr@igm.nsc.ru*

Аннотация. Геоэкологический мониторинг состояния Убинского горелого и Шерстобитовского рямов Барабинской лесостепи на основе комплекса геохимических критериев показал, что индикаторные компоненты экосистемы Убинского горелого рьяма (лесная подстилка, почва, биообъекты) подвержены антропогенному загрязнению тяжелыми металлами (Pb, Hg, Cd, Sb, Cu, Zn), которое является следствием частых пожаров. Выявлено увеличение в верхних интервалах торфяников концентраций Fe, Mn, Pb, Hg, Sb, Cd, Cu, Zn, в средних интервалах – S, N, Ca, Sr, Mg.

Ключевые слова: верховые болота, голоцен, органическое вещество, растения-торфообразователи, болотные воды, тяжелые металлы, фоновый уровень, геохимические критерии оценки загрязнения

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (региональный проект № 17-45-540063 p_a) и по государственному заданию ИГМ СО РАН в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Для цитирования: 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. 2022. № 4. С. 76–95. doi: 10.17223/25421379/25/5

Original article

doi: 10.17223/25421379/25/5

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE OF UPPER BOGS (RYAMS) OF THE BARABIN FOREST STEPPE UNDER ANTHROPOGENIC IMPACT

Galina A. Leonova¹, Anton E. Maltsev², Yulia I. Preis³, Vladislav A., Bobrov⁴

^{1, 2, 4} *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

³ *Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

¹ *leonova@igm.nsc.ru*

² *maltsev@igm.nsc.ru*

³ *preisyui@rambler.ru*

⁴ *bobr@igm.nsc.ru*

Abstract. The two sampled peatlands of the Baraba steppe are compositionally heterogeneous and consist of bog and fen peat types. The Ubinskoe section is composed of Sphagnum fuscum peat and encloses layers of combusted transitional woody peat in the upper part (0–257 cm) and grass, woody-grass, and sphagnum peat in the lower part (257–347 cm). The Sherstobitovo section comprises Sphagnum magellanicum peat in upper 70 cm and diverse grass, woody-grass, and sphagnum peat species in the lower 70–250 cm interval. According to ¹⁴C constraints, peat accumulation in the two peatlands began, respectively, at 5.6 and 4.5 kyr BP. The uneven profiles of main biogenic elements record peat composition changes at different evolution stages. Deep peat intervals were deposited in the time span from 5.6 to 2.7 ¹⁴C kyr BP at relatively high concentrations of S and N in organic matter. Both Ubinskoe and Sherstobitovo samples show significant correlation of C/N ratios with the degree of OM de-

composition ($r = -0.93$ and -0.82 , respectively) and with peat depth ($r = -0.61$ and -0.76), which confirms increasing OM degradation. The heterogeneity in the distribution of the main biogenic elements (C, H, N, S) along the peat bog sections marks the change in the botanical composition of peat at different stages of bog formation. All chemical elements can be conditionally divided into four main groups: 1. Li, Al, Na, K, Fe, Cr, Mn, Ni - included in the terrigenous (detrital) part of peat; 2. Ca, Sr, Mg; with maximum concentrations in the lower intervals of peat sections; 3. Pb, Sb, Hg, Cu, Zn — chalcophilic elements, with maxima in the upper intervals of peat sections. The profiles of iron-group elements (Fe, Mn, Cr, and Ni) stand out among other elements common to the clastic peat component. Judging by similarity of concentrations and Al, K, and Na patterns, silicate and aluminosilicate material had the same source: atmospherically-derived soil dust. The sampled sections show a tendency of increasing Ca (and partly Mg, Sr) downward from upper 60 cm of the Sherstobitovo peat and 112 cm of the Ubinskoe peat, which was reported also for other raised bogs. The greater concentrations of Cu, Zn, As, Se, Cd, Sb, Hg, and Pb in upper layers may be attributed to natural and man-caused atmospherically-derived dust inputs in the 20th and 21st centuries, which agrees with published evidence. An assessment of the pollution of bog waters based on a set of geochemical criteria shows that the highest concentration coefficients (Kc) of elements (As, Pb, Zn, Cu, Mn) involved in atmospheric transport during fires are found in the bog waters of the Ubinsky burnt ryam. Comparative analysis of the values of concentration coefficients (Kc) in the studied components of the Ubinsky burnt ryam ecosystem (forest litter, upper soil horizon, indicator biological objects — moss, lingonberry and birch leaves) indicates an intensive accumulation of chalcophilic elements (Pb, Sb, Cu, Hg) in them, which may be a consequence of the anthropogenic impact on the raised bog during fires.

Keywords: peat bogs, organic matter, peat-forming plants, bog waters, heavy metals, background level, geochemical criteria for assessing pollution

Source of financing: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (regional project no. 17-45-540063 r_a). The work was carried out under the state order of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS at the Center for Collective Use of Multielement and Isotope Research of the SB RAS.

For citation: Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Bobrov V.A. (2022) Geoecological assessment of the current state of upper bogs (Ryams) of the Barabin forest steppe under anthropogenic impact. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 76–95. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/5

Введение

Болота широко распространены на территории Западной Сибири. Этому способствовали специфические геоморфологические условия, относительно выровненный характер поверхности и слабая дренированность. Большая протяженность территории в меридиональном направлении определяет широкий спектр биоклиматических условий и разнообразие болотных экосистем (низинные, переходные, верховые), которые занимают в отдельных районах Западной Сибири от 30 до 80 % площади [Лисс и др., 2001; Наумов и др., 2009]. На территории Барабинской лесостепи расположены сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы), которые по условиям водно-минерального питания относятся к верховым и характеризуются преимущественно атмосферным питанием. Атмосферные выпадения (дождь, снег) являются основным источником поступления химических элементов на их поверхность. В настоящее время рямы Барабинской лесостепи имеют характер фрагментов верховых болот, вкрапленных в низинные болота [Степанова, Волкова, 2017].

Верховые болота Барабинской лесостепи сформировались в конце суббореального периода в условиях похолодания и повышения влажности климата [Хазин и др., 2016]. В современных условиях глобального потепления возникла реальная угроза потери этих уникальных реликтовых комплексов, кото-

рые расположены на южной границе ареала распространения верховых болот и испытывают наибольшее влияние изменения климата и антропогенного воздействия. Большую тревогу вызывают пожары, о чем свидетельствуют анализ снимков в системе Google Earth данной территории и рекогносцировочные работы на местности: большая часть рямовых комплексов, отнесенных к категории региональных памятников природы, пройдена пожарами [Наумов и др., 2009; Степанова, Волкова, 2017]. Широкомасштабная мелиорация верховых болот Барабинской лесостепи в первой половине XX в. вызвала их обсыхание, а частые пожары обусловили снижение их биоразнообразия и биопродуктивности, уменьшение запасов торфа из-за его вторичного разложения и выгорания. В связи с этим становится вполне очевидной необходимость проведения комплексного геоэкологического мониторинга состояния верховых болот (рямов) лесостепной зоны Западной Сибири. Известно, что рямовые комплексы в естественном ненарушенном состоянии играют важную роль в поддержании уровня грунтовых вод, тем самым обеспечивая стабильное состояние природной среды прилегающих территорий [Лисс и др., 2001].

Верховые болота Барабинской лесостепи являются удобными и перспективными модельными объектами для геохимических и геоэкологических исследований. Погребенные залежи сфагнового торфа сохраняют химический состав по глубине стратифи-

цированных горизонтов, тем самым отражая химический состав атмосферных выпадений в прошлом и настоящем [Гавшин и др., 2004; Бобров, Прейс, Будашкина, 2013; Бобров и др., 2019]. В мире большое внимание уделяется изучению особенностей распределения химических элементов по глубине полных голоценовых разрезов торфяных залежей вплоть до подстилающих грунтов [Helmer, Urban, Eisenreich, 1990; Steinmann, Shotyk, 1997; Shotyk et al., 2001; Malawskaand, Wilkomirski, 2004; Gorham, Janssens, 2005; Kempster et al., 2017]. Подобные исследования верховых болот лесной и лесостепной зон Западной Сибири практически не проводились, за исключением немногочисленных работ по геохимии полных разрезов верховых торфяников [Ефремова и др., 2003; Прейс, Бобров, Сороковенко, 2010; Прейс и др., 2010; Архипов, Бернатонис, 2013; Бобров, Прейс, Будашкина, 2013; Savichev, 2015; Stepanova et al., 2015; Савичев и др., 2019] и геохимии болотных вод данного региона [Савичев, Шмаков, 2012; Шварцев и др., 2012; Савичев, 2015]. Это и послужило причиной начать аналогичные исследования полных голоценовых разрезов верховых торфяников Барабинской лесостепи.

Цель данной работы – исследовать геохимические процессы постседиментационных превращений органического и минерального вещества торфяных отложений и болотных вод, перераспределение хи-

мических элементов по глубине голоценовых разрезов торфяников, дать оценку степени антропогенного воздействия на верховые болота лесостепной зоны Западной Сибири на основе комплекса геохимических критериев.

Объекты и методы исследований

В сентябре 2017–2018 гг. опробованы два верховых болота Барабинской лесостепи. Убинское верховое болото (координаты 55°18'40" с.ш., 79°42'25" в.д.) расположено в Убинском районе Новосибирской области у с. Убинское. Шерстобитовское верховое болото (координаты 54°58'58" с.ш., 81°00'58" в.д.) – в Чулымском районе Новосибирской области у с. Шерстобитово (рис. 1). Выбраны наиболее показательные ключевые участки Шерстобитовского болота, находящегося в естественном ненарушенном состоянии и Убинского горелого болота – антропогенно нарушенного, имеющего признаки влияния мелиорации и пожаров. Проведено бурение торфяных залежей Убинского горелого ряма (кern 4 м) и Шерстобитовского ряма (кern 3 м) до подстилающих грунтов торфяным буром БТГ-1. Керны торфа были герметично упакованы в пластиковые трубы и до проведения химических анализов хранились в холодном помещении кернохранилища.

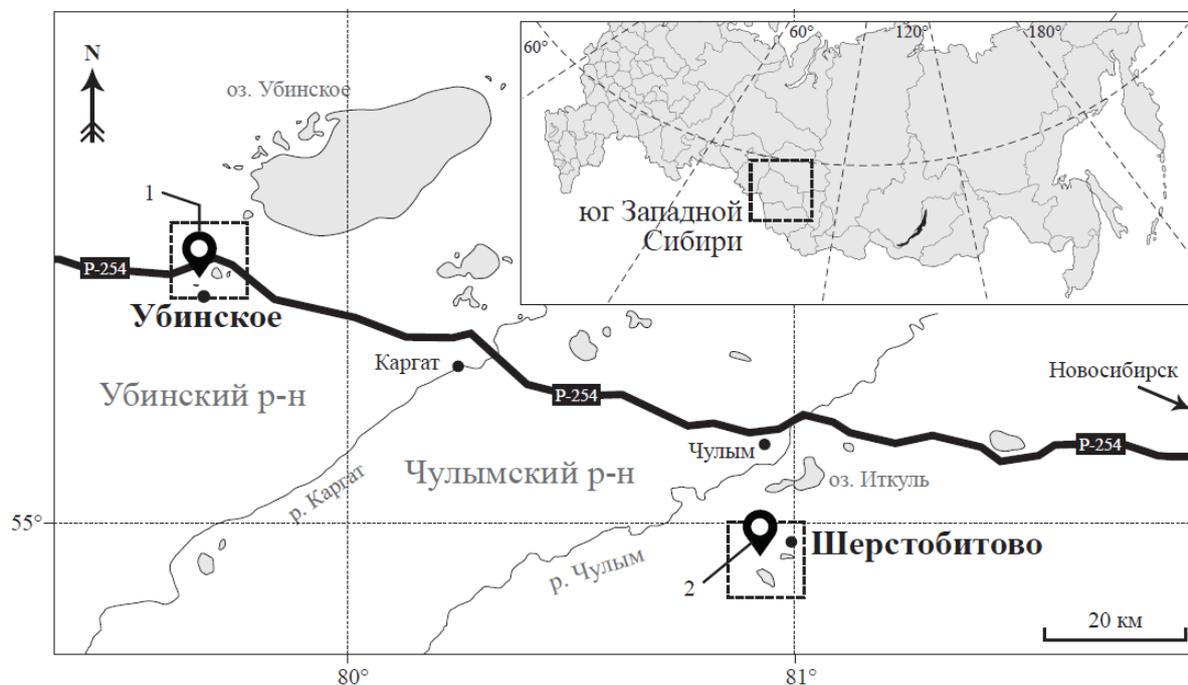


Рис. 1. Карта-схема района исследования (Барабинская лесостепь, Новосибирская область)

1 – Убинский горелый рям (Убинский район), 2 – Шерстобитовский рям (Чулымский район)

Fig. 1. Schematic map of the study area (Barabinsk forest-steppe, Novosibirsk region)

1 – Ubinsky burnt ryam (Ubinsky district), 2 – Sherstobitovskiy ryam (Chulymsky district)

Выполнено геоботаническое обследование с описанием растительного покрова рямовых комплексов. Шерстобитовский рям в настоящее время представлен березово-сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом. Густой древесный ярус образован сосной обыкновенной *Pinus sylvestris* L. и березой пушистой *Betula pubescens* (Ehrh.). Напочвенный хорошо развитый сплошной моховой покров состоит преимущественно из сфагновых мхов *Sphagnum magellanicum* Brid. Убинский горелый рям представлен пирогенным березово-осиново-кустарничковым фитоценозом. Густой древесный ярус образован молодыми осинами (*Populus tremula* L.) и березами (*B. pubescens*). Напочвенный моховой покров состоит из сфагновых мхов *Sphagnum fuscum* (Schimp.) N. Klinggr., который под влиянием антропогенных факторов (мелиорация, пожары) в настоящее время сильно разрежен.

Отбор проб дождевой и болотной воды проводили в сентябре 2017 г. В отобранной воде сразу измеряли неустойчивые физико-химические параметры – водородный показатель (рН) и окислительно-восстановительный потенциал (Eh). Болотную и дождевую воду на гидрохимический анализ (катионы и анионы) не консервировали, а на микроэлементный анализ консервировали добавлением концентрированной азотной кислоты (о. ч.) из расчета 4 мл кислоты на 1 л раствора.

Оценку степени антропогенного воздействия на компоненты рямовых комплексов на участках, пройденных пожарами, проводили путем сравнения содержания химических элементов на фоновых (прилегающих к пожарищу территориях) и выгоревших площадях по комплексу геохимических критериев согласно [Сает, Ревич, Янин, 1990]. Образцы мхов и лесной подстилки, обугленных при пожаре, а также подстилающей их почвы (верхние 5 см) на выгоревших участках отбирали стандартным стальным кольцом (диаметр 82 мм, высота 50 мм, объем 264 см³), обычно применяемом при геоэкологических исследованиях. Отбор проб мхов на фоновом участке, а также листьев березы и брусничника на обоих участках проводили вручную. Все образцы индикаторных компонент фоновых и антропогенно нарушенных биогеоценозов отбирали в пяти точках по линиям трансекты.

Гидрохимический анализ (определение содержания ионов HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , показателей биохимического (БПК) и химического потребления кислорода (ХПК) в дождевых и болотных водах проведен комплексом общепринятых методов [ПНД Ф 14.1:2.96–97, 2004; ПНД Ф 14.1:2.159–2000, 2005; РД 52.24.493–2006, 2006; ГОСТ Р 57162-2016, 2016] в лаборатории контроля

качества природных и сточных вод ФГУ «ВерхнеОбьрегионводхоз». Анионы HCO_3^- , Cl^- определяли титриметрическими методами анализа, SO_4^{2-} – турбиметрическим, NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} и NH_4^+ – фотометрическими методами анализа.

Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП АЭС) определены концентрации макрокомпонентов (К, Na, Ca, Mg) и микроэлементов (Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Ag, Ba, Hg, Pb) в дождевых и болотных водах в аналитической лаборатории Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН.

Методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) определены валовые концентрации Al, K, Na, Ca, Li, Mg, Hg, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr, Co, Fe, Mn, Sr, Ag, Be, Au, As в образцах торфа и биообъектов в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН).

Степень накопления химических элементов по глубине торфяных разрезов выражали отношением концентрации изучаемого элемента в торфе к концентрации опорного элемента (Al) и рассчитывали «коэффициенты обогащения» (Enrichment Factor – EF) согласно подходу [Shoty et al., 1996]. Для выявления геохимической специфики торфов в качестве образца сравнения использовали выдержанные по химическому составу глинистые сланцы из сводки [Li, 1991].

Оценка геоэкологического состояния рямовых экосистем проведена по геохимическим критериям:

1. Коэффициент концентрации (K_c) характеризует степень концентрирования элемента в компонентах природной среды в зоне загрязнения относительно его фонового содержания [Авессаломова, 1987]:

$$K_c = (C_i) / (C_\phi),$$

где C_i – концентрация i -го химического элемента в зоне загрязнения; C_ϕ – фоновое содержание этого элемента.

2. Формула геохимической ассоциации (ФГА) [Сает, 1982; Сает, Ревич, Янин, 1990; Янин, 2002] характеризует качественный (элементный состав) и структуру геохимической аномалии (состав техногенного загрязнения) и представляет собой упорядоченную по значениям K_c совокупность (ранжированный ряд) химических элементов в природном объекте. Формула геохимической ассоциации изображается, например, так: $\text{Hg}_{150}\text{-Cd}_{110}\text{-Ag}_{78}\text{-As}_{51}\text{-Zn}_{23}\text{-Pb}_{11}\text{-Sb}_5$, где цифровые индексы около символов химических элементов представляют их коэффициенты концентрации (K_c).

Результаты и обсуждение

Общая характеристика торфяных разрезов. Стратиграфия и изменение некоторых параметров

(степень разложения торфа – R, значения pH, зольности, влажности и плотности) по глубине торфяников Шерстобитовского и Убинского горелого рямов представлены на рис. 2. На антропогенно нарушенном Убинском горелом ряме разрез торфяной залежи заложен в пониженной приозерной части. Исследованный участок расположен на периферии олиготрофного болота. Уровень болотных вод находится на глубине 24 см. Торфяная залежь имеет мощность 347 см и состоит из двух слоев (рис. 2, а). Мощный слой верхового торфа (0–257 см) образован сфагновым-фускум (*Sphagnum fuscum*) торфом с прослойками пирогенного пере-

ходного древесного торфа на поверхности залежи. Нижний слой торфяной залежи (257–347 см) образован различными видами низинных торфов – травяных (остатки рогоза, тростника, осок); древесно-травяных; сфагновых (*Sphagnum teres*). Ниже торфяной залежи (347–367 см) залегают сапропелевидные органо-минеральные отложения озерного генезиса (остатки макрофитов, прибрежно-водных растений, минеральная примесь), которые подстилаются минеральными отложениями (оглееный суглинок). Возраст торфяной залежи оценивается в 5,6 ¹⁴C тыс. лет, возраст всего вскрытого разреза – в 6,2 ¹⁴C тыс. лет.

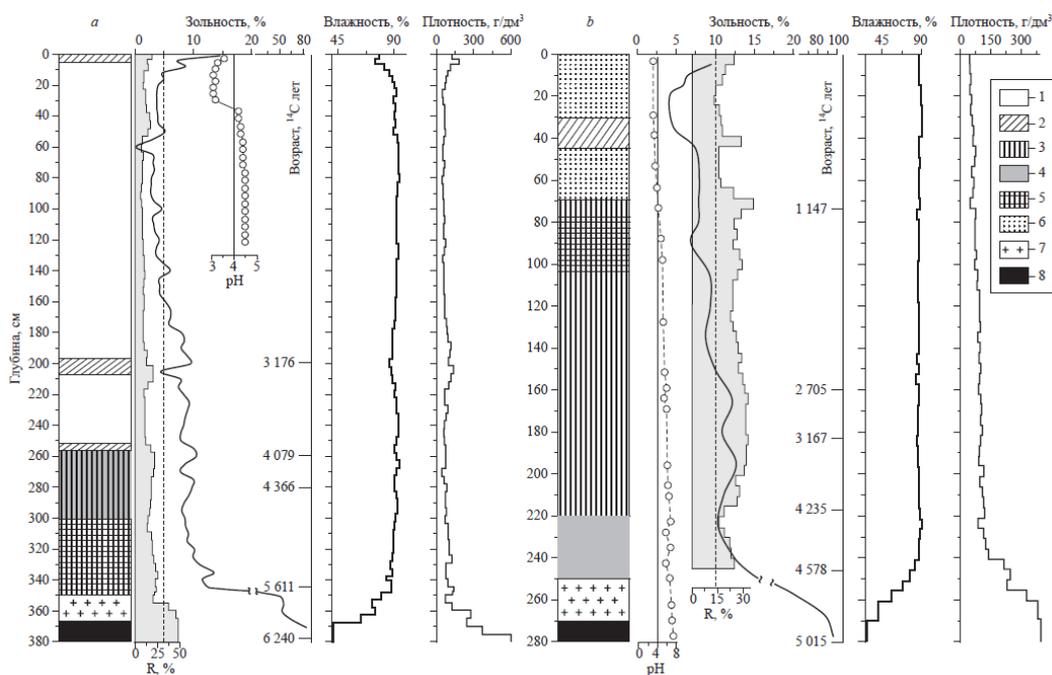


Рис. 2. Стратиграфия, возраст ¹⁴C, степень разложения (R), распределение pH, зольности, плотности, влажности по разрезам Убинского (а) и Шерстобитовского (б) торфяников

Растительные остатки: 1 – *Sphagnum fuscum* (верховой торф), 2 – древесные остатки, 3 – разнотравье, 4 – *S. teres*, 5 – тростник, 6 – *S. magellanicum* (верховой торф), 7 – органо-минеральные отложения, 8 – минеральные отложения

Fig. 2. Stratigraphy, age ¹⁴C, degree of decomposition (R), distribution of pH, ash content, density, moisture along the sections of Ubinsky (a) and Sherstobitovskiy (b) peat bogs

Plant remains: 1 – *Sphagnum fuscum* (high moor peat), 2 – woody remains, 3 – forbs, 4 – *S. teres*, 5 – reed, 6 – *S. magellanicum* (high moor peat), 7 – organomineral deposits, 8 – mineral deposits

На Шерстобитовском ряме, не тронутым пожарами и мелиорацией, разрез торфяной залежи заложен в западной части. Уровень болотных вод находится на глубине 14 см. Торфяная залежь смешанная, многослойная лесо-топяная, имеет мощность 250 см и состоит из двух слоев (рис. 2, б). Верхний слой (0–70 см) представлен верховым магелланикум-торфом (*Sphagnum magellanicum*) с прослойкой древесного торфа в интервале разреза (30–45 см). Нижний слой

(70–250 см) мощностью 180 см образован различными видами низинных травяных, древесно-травяных и сфагновых торфов. Торфяная залежь подстилается (250–270 см) органо-минеральными отложениями, ниже которых залегают гумусированные минеральные отложения вплоть до глубины 280 см, а глубже – светлые глины. Возраст торфяной залежи оценивается в 4,5 ¹⁴C тыс. лет, возраст всего вскрытого разреза – в 5,0 ¹⁴C тыс. лет.

Распределение зольности по глубине голоценовых разрезов торфяных залежей в целом однотипно (рис. 2, а, б). Значения зольности довольно выдержаны с небольшой тенденцией увеличения с глубиной, незначительно отличаясь в слоях торфа верхового и низинного типов. Резкое увеличение зольности отмечается на границе перехода от торфов к органоминеральным и ниже к минеральным отложениям. Зольность поверхностного пирогенного слоя торфа Убинского горелого яма (0–3 см) достигает максимального значения – 14,5 %, ниже по разрезу в слое торфа верхового типа она изменяется от 2,5 до 10,1 %, в слое торфа низинного типа незначительно повышается и варьирует в пределах значений 7,8–12,9 %. В слое органоминеральных отложений зольность резко увеличивается до 51–65 %, а в подстилающих минеральных отложениях достигает значений 83 %. Величина зольности в слое верхового торфа Шерстобитовского яма варьирует в пределах 4,3–9,6 %, также незначительно повышается в слое низинного торфа, изменяясь в пределах 7,0–13,9 %, резко увеличивается в слое органоминеральных отложений до 54–87 % и достигает максимального значения в минеральных отложениях – 96 %.

Распределение значений влажности торфа по разрезам исследуемых торфяников равномерно (рис. 2 а, б). В верховом торфе Убинского и Шерстобитовского ямов влажность варьирует в пределах 74–91 % и 88–91 % соответственно, в низинном торфе 78–94 и 83–91 %, в органоминеральных отложениях 63–79 и 40–78 %, в подстилающих минеральных отложениях уменьшается до 28 %.

При значительном варьировании показателей плотности по разрезу торфяной залежи Убинского горелого яма (45–187 г/дм³) средние ее значения для слоев верхового и низинного торфа различаются незначительно – 75,9 и 87,4 г/дм³ соответственно. В органоминеральных отложениях значение плотности увеличивается до 323 г/дм³. По разрезу торфяной залежи Шерстобитовского яма плотность изменяется в пределах 42–203 г/дм³. Средние показатели плотности для верхового торфа составляют 56,8 г/дм³, для низинного торфа – 91,9 г/дм³, для органоминеральных отложений – 277 г/дм³, для минеральных отложений – 288 г/дм³.

Распределение биогенных элементов и отношения C/N по разрезам торфяников. Торфяные разрезы Шерстобитовского и Убинского горелого верховых болот характеризуются выдержанными значениями органического углерода (C_{орг}) по всей глубине залежи (табл. 1). В торфяной залежи Шерстобитовского болота содержание C_{орг} изменяется в пределах 45–48 %, в нижних интервалах на границе с органоминеральными отложениями значения C_{орг} резко пада-

ют до 10 %, а в подстилающих их минеральных отложениях до 3 %. В торфяной залежи Убинского горелого болота содержание C_{орг} находится в пределах 42–44 %, в органоминеральных отложениях снижается до 27–32 %, в минеральных отложениях падает до 8–3 %.

Распределение водорода по разрезам торфяных залежей выдержанное. Концентрации Н в торфе очень близки для обоих торфяников и составляют 4,7–5,5 %, в органоминеральных отложениях – 3,3–4,1 %, в минеральных отложениях – 0,9 %.

Установлено увеличение содержаний азота по глубине торфяных разрезов. В верховом торфе Шерстобитовского болота содержание N составляет 1,1–1,5 %, в низинном торфе оно несколько выше 2,5–3,3 %, в органоминеральных отложениях – 2,4 %, в минеральных отложениях – 0,5–0,9 %. В верховом торфе Убинского горелого болота содержание N находится в пределах 0,9–1,8 %, в низинном торфе – 2,0–2,7 %, в органоминеральных отложениях падает до 0,4 %.

Установлено, что в верховом торфе Убинского горелого болота до глубины 187 см содержания S ниже предела обнаружения (менее 0,2 %). Вниз по разрезу в низинном торфе наблюдается резкое увеличение содержания S от 0,88 до 3,65 % с последующим снижением концентраций в органоминеральных и минеральных отложениях до 1,0–1,4 %. Распределение S в торфе Шерстобитовского болота идет синхронно с распределением N. В верхних интервалах торфа (0–65 см) содержания серы также ниже предела обнаружения. Интервал низинного торфа (165–250 см) характеризуется самыми высокими значениями S от 3,51 до 3,0 %.

Неоднородности в распределении основных биогенных элементов по разрезам исследованных торфяников хорошо маркируют смену ботанического состава торфа на разных этапах формирования болот. Увеличение содержания N по глубине торфяных залежей от верхового к низинным торфам обусловлено сменой видового состава растений – продуцентов органического вещества: сфагновые мхи, слагающие верховой торф, сменяются прибрежно-водной растительностью (тростник, рогоз) и разнотравьем, слагающими низинный торф. Изменение содержаний биогенных элементов, обусловленное сменой вещественного состава органического вещества, особенно ярко прослеживается в разрезе Шерстобитовского болота, где наблюдается четкая тенденция увеличения концентраций N и S по глубине разреза (табл. 1). Помимо смены вещественного состава органического вещества, резкое увеличение концентраций S по глубине разрезов торфяников может свидетельствовать о деятельности микроорганизмов,

участвующих в восстановлении SO_4^{2-} до H_2S , что сопровождается образованием аутигенных сульфидов различных металлов, прежде всего пирита согласно [Leonova et al., 2021]. Также по [Юдович, Кетрис, 2011] рост содержания S в нижних интервалах торфа может быть связан с осернением органического вещества в процессе раннего диагенеза.

Отношение органического углерода к органическому азоту (C/N) в вертикальных профилях торфяных залежей и сапропелевых отложениях является органо-геохимическим маркером источников поступления и генезиса захороненного органического вещества [Леонова и др., 2019], а также C/N-отношение маркирует смену ботанического состава торфа и является индикатором процессов гумификации [Borgmark, 2005]. Интервалы верхового торфа с преобладанием в ботаническом составе сфагнового мха характеризуются более высокими значениями отношения C/N (табл. 1). Так, в верховом торфе Убинского горелого болота C/N изменяется в пределах 24–74, Шерстобитовского болота – в пределах 30–44. Интервалы низинного травяного торфа с преобладанием в ботаническом составе прибрежно-водных растений (тростник, рогоз), осок, вахты имеют существенно меньшие значения C/N. В низинном торфе Убинского горелого болота C/N изменяется в пределах 12–23, Шерстобитовского болота – в пределах 14–18. Таким образом, отношение C/N хорошо маркирует интервалы слоев верхового сфагнового и низинного травяного торфа. В целом для разрезов Убинского горелого и Шерстобитовского болот получены значимые коэффициенты корреляции отношения C/N и степени разложения торфа ($r = -0,95$ и $-0,87$), а также отношения C/N и глубины залежи ($r = -0,61$ и $-0,76$), что подтверждает тенденцию роста степени деструкции органического вещества с глубиной. Однако если для слоев верхового

торфа этих разрезов коэффициенты корреляции отношения C/N и степени разложения торфа остаются значимыми ($r = -0,93$ и $-0,71$), то для слоев низинного торфа их значимость резко понижается ($r = -0,47$ и $-0,27$). Последнее обусловлено значительным разнообразием ботанического состава низинных торфов, влияющим на их степень разложения.

Распределение химических элементов по разрезам торфяников. По коэффициентам корреляции все исследованные химические элементы хорошо разбиваются на группы (табл. 2). Первую группу составляют химические элементы, входящие в терригенную (обломочную) часть материала торфа – Li, Al, Na, K, Fe, Cr, Mn, Ni, для них характерна сильная прямая корреляция (до 0,98 %) с распределением зольности по разрезам. Они характеризуются относительно устойчивым увеличением концентраций от поверхности торфяников вглубь разреза к минеральным отложениям с ярко выраженным максимумом в минеральных отложениях, что обусловлено повышением их зольности. Вторую группу составляют Ca, Sr, частично Mg. Эти химические элементы характеризуются резким увеличением концентраций в средних и нижних интервалах, представленных низинным торфом. Третья группа – халькофильные элементы Pb, Sb, Hg, Cu, Zn, As, характеризующие загрязненность современной атмосферы. Для них характерны хорошо выраженные максимумы концентраций в верхних интервалах торфяников. Благородные металлы Ag и Au не имеют значимых коэффициентов корреляции с другими элементами, за исключением значимой положительной корреляции между Ag–As ($r = 0,65$) в Шерстобитовском торфянике. В целом для Au, Ag и As характерно отсутствие общих закономерностей в распределении по разрезам исследованных торфяников.

Таблица 1
Распределение биогенных элементов и отношения C/N по разрезам торфяников

Table 1

Distribution of nutrients elements and C/N ratios across peat sections

Горизонт, см	C, %	H, %	N, %	S, %	C/N
Шерстобитовский торфяник					
<i>S. magellanicum</i>	44,48	5,18	0,77	0	58
5	45,48	5,18	1,46	0	30
20	47,62	5,31	1,08	0	44
35	48,15	5,1	1,46	0	33
50	48,29	5,42	1,39	0	35
65	48,19	5,19	1,34	0	36
80	48,53	4,95	2,75	1,65	18
105	47,1	5,25	3,02	2,32	16
135	46,74	5,47	3,25	3,03	14
150	46,21	5,4	3,21	2,99	14
165	45,77	5,12	3,3	3,51	14
180	45,01	5,1	3,22	3,37	14
195	44,92	5,02	3,11	3,74	14

Горизонт, см	C, %	H, %	N, %	S, %	C/N
210	46,25	4,85	2,91	3,9	16
225	44,82	4,93	2,48	3,74	18
245	45,1	4,83	2,57	3,81	18
250	35,86	3,98	2,49	3,72	15
265	10,01	1,26	0,9	1,52	11
275	3,51	0,79	0,48	1,49	7
Убинский горелый торфяник					
<i>S. fuscum</i>	43,63	5,35	0,9	0	48
3	42,29	4,67	1,81	0	24
6	46,92	5,47	1,1	0	43
22	46,56	5,47	0,84	0	55
37	48,57	5,25	1,1	0	44
67	45,14	5,26	0,7	0	64
97	47,47	5,37	0,64	0	74
127	47,76	5,34	0,65	0	73
157	47,89	5,76	0,88	0	54
187	46,81	5,31	0,94	0,88	50
217	46,54	5,04	0,82	2,06	57
247	45,36	5,07	0,93	1,87	49
287	46,81	4,91	2,02	2,66	23
307	47,29	5,18	2,71	2,81	17
337	44,96	4,93	2,67	3,65	17
347	32,94	4,05	2,71	3,4	12
352	27,12	3,27	2,36	2,67	11
367	8,77	1,38	0,85	1,38	10
372	3,03	0,93	0,44	1	7

Таблица 2

Значимые коэффициенты корреляции (не менее 0,65) содержания химических элементов, зольности (Зол.) и C_{орг} в профилях Убинского (У) и Шерстобитовского (Ш) торфяников

Table 2

Significant correlation coefficients (not less than 0.65) of the content of chemical elements, ash content (Ash.) and C_{org} in the profiles of the Ubinsky (U) and Sherstobitovsky (Sh) peat bogs

Рям	Группа I											
	Зол-Al	Fe-Al	Na-Al	K-Al	Mn-Al	Co-Al	Ni-Al	Li-Al	Cr-Al	Mg-Al	Fe-Mn	Fe-C _{орг}
У	0,96	0,97	0,98	0,98	0,93	0,98	0,99	0,93	0,96	0,99	0,94	-0,67
Ш	0,99	0,97	0,99	1,00	0,76	0,94	0,93	1,00	0,98	-	0,86	-0,97

Рям	Группа II			Группа III								
	Ca-Sr	Ca-Mg	Mg-Sr	Cu-Zn	Cu-C _{орг}	Zn-C _{орг}	Pb-Sb	Pb-Hg	Pb-Cd	As-Cu	As-Zn	As-Ag
У	0,78	-	-	0,96	-	-	0,91	-	-	0,87	0,80	-
Ш	0,99	0,89	0,88	0,95	-0,90	-0,88	0,76	0,85	0,75	0,74	0,77	0,65

Распределение химических элементов по разрезам исследованных торфяников представлено в табл. 3, 4. Стоит отметить, что для Al, K, Na, Fe увеличение их содержания в верхних интервалах торфа связано с атмосферным питанием верховых болот и поступлением данных химических элементов с атмосферной пылью. Так, для верхнего интервала торфа (0–5 см) в Убинском горелом торфянике установлены следующие содержания – Al (1,1%), K (0,25%), Na (0,11%) и Fe (0,8%), в Шерстобитовском – Al (0,46%), K (0,1%), Na (0,07%) и Fe (0,17%). Поскольку Al является одним из основных зольных компонентов торфов, то, соответственно, с увеличением зольности в разрезах торфяников синхронно увеличиваются концентрации Al в расчете

на сухую массу торфа. Алюминий находится в торфяниках Убинского горелого и Шерстобитовского верховых болот в составе тонкодисперсных глинистых минералов. Таким образом, по сходству распределения Al, Fe, K, Na по разрезам торфяников (табл. 3, 4) можно сделать заключение об едином источнике поступления силикатного и алюмосиликатного материала – с атмосферными выпадениями (пыль).

Распределения Fe и Mn тесно коррелируют между собой (см. табл. 2), что отражает сходную направленность биогеохимической миграции данных химических элементов в ходе формирования торфяных залежей. Источником их поступления на поверхность верховых торфяников являются атмосферные выпадения. Большую роль в геохимии Fe и

Mn играют окислительно-восстановительные условия согласно [Ефремова и др., 2003]. Поверхностный слой торфяной залежи (0–5 см) характеризуется значениями Eh > 0 и является окислительным геохимическим барьером, на котором концентрируются химические элементы с переменной степенью окисления – Fe и Mn (табл. 3, 4). Поэтому, помимо атмосферного привноса, увеличение концентраций Fe и Mn в верхних интервалах торфяников может быть связано с окислением здесь восстановленных форм Fe и Mn, поступающих с болотными водами из нижних горизонтов торфяников с восстановительной обстановкой.

В исследованных торфяниках установлено увеличение концентраций Ca (частично Mg, Sr) от верхних (0–60 см, Шерстобитовское болото) и средних (0–112 см, Убинское горелое болото) к более глубоким участкам торфяных залежей (табл. 3, 4). Распределение Ca определенным образом дифференцировано по разрезам торфяников: верхний горизонт, представленный главным образом слабо разложившимися сфагновыми торфами, несколько обеднен кальцием (0,30–0,58 %) в отличие от основной

залежи (1,04–1,37 %). Установлено, что в верховом торфе исследованных болот содержится меньше Ca по сравнению с низинным типом торфа, возможно, за счет выноса его приповерхностным стоком, что приводит к частичному обеднению кальцием верхних горизонтов торфяников. Рост содержания Ca в более глубоких слоях (низинный торф) косвенно указывает на изменение водного режима и обводненности болот на ранних этапах их развития в голоцене. Так, средние содержания кальция в интервалах низинного торфа для Убинского горелого (250–372 см, Ca = 1,37 %) и Шерстобитовского болот (70–275 см, Ca = 1,45 %) близки к содержаниям Ca (0,78–3,00 %) для торфов низинного типа Западной Сибири по данным [Архипов и Бернатонис, 2013; Веретенникова, 2013], а средние содержания кальция в интервалах верхового торфа Убинского горелого (0–112 см, Ca = 0,52 %) и Шерстобитовского болот (0–60 см, Ca = 0,40 %) близки к содержаниям Ca (0,18–1,00 %) для торфов верхового типа болот Западной Сибири согласно [Архипов, Бернатонис, 2013; Веретенникова, 2013].

Таблица 3

Распределение химических элементов по разрезу Убинского горелого торфяника

Table 3

Distribution of chemical elements along the Ubinsky burnt peat bog section

Гор-т, см	Fe	Al	Ca	Mg	K	Na	Cr	Be	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Mn	Cd	Sb	Li	Sr	As	Hg	Au	Ag	
	%						мг/кг															мкг/кг	
Мох	0,51	0,53	0,67	0,12	0,19	0,064	12,0	0,20	1,5	5,5	11	30	48	270	0,21	0,79	1,9	40	–	–	–	–	
3	0,80	1,10	0,69	0,13	0,25	0,11	16,0	0,52	3,1	9,3	16	80	40	198	0,11	1,3	3,5	94	3	35	2,7	77	
6	0,30	0,52	0,53	0,068	0,078	0,049	6,9	0,18	1,2	3,9	7,2	38	6,3	20	0,048	0,54	1	78	1,9	40	4,6	430	
10	0,19	0,29	0,59	0,077	0,049	0,028	4,8	0,11	0,77	2,2	4	15	4	14	0,023	0,3	0,65	77	1	32	1,1	21	
14	0,20	0,25	0,53	0,078	0,04	0,023	4,1	0,091	0,67	2,1	4,1	14	4,3	16	0,025	0,33	0,53	71	2,2	31	2,1	54	
18	0,17	0,21	0,55	0,079	0,005	0,019	3,9	0,092	0,57	2,0	3,6	7,4	3,5	11	0,018	0,23	0,43	70	1,8	20	0,1	160	
22	0,13	0,17	0,61	0,087	0,033	0,022	4,0	0,061	0,6	1,4	3,1	3,2	4	2,5	0,009	0,14	0,53	55	1,8	18	5,7	250	
37	0,13	0,21	0,49	0,074	0,029	0,023	3,6	0,065	0,84	1,7	3,3	6,5	6	11	0,039	0,16	0,49	62	1,1	19	7,7	70	
52	0,079	0,24	0,49	0,073	0,037	0,031	3,5	0,055	0,43	1,1	3	1,5	5,5	12	0,016	0,01	0,65	63	0,8	15	0,1	110	
67	0,072	0,15	0,49	0,071	0,023	0,026	3,1	0,045	0,36	0,94	2,7	2,4	6,6	15	0,013	0,1	0,56	58	1,9	13	0,1	73	
82	0,073	0,13	0,46	0,067	0,013	0,024	3,7	0,031	0,34	0,05	1,3	1,4	7,3	13	0,048	0,01	0,47	62	0,05	22	0,1	820	
97	0,06	0,01	0,43	0,052	0,014	0,026	3,8	0,033	0,32	0,05	1,5	0,1	5,8	13	0,01	0,01	0,43	43	0,86	17	4,2	2500	
112	0,062	0,02	0,45	0,056	0,017	0,023	3,9	0,036	0,26	0,05	1,9	0,1	6,3	14	0,017	0,01	0,41	65	0,92	18	1,2	1600	
127	0,071	0,05	0,71	0,063	0,025	0,037	4,2	0,048	0,29	0,05	2,2	0,1	7,1	18	0,18	0,01	0,6	82	0,76	12	0,1	170	
142	0,074	0,11	0,74	0,065	0,043	0,049	4,9	0,08	0,41	0,57	2,2	0,1	6,6	20	0,022	0,01	0,83	97	0,05	20	3,2	240	
157	0,067	0,03	0,86	0,064	0,018	0,024	3,9	0,059	0,28	0,05	1,9	0,1	6,6	18	0,02	0,01	0,44	104	0,87	22	2,4	830	
172	0,071	0,1	0,91	0,067	0,030	0,036	4,9	0,058	0,3	0,91	3,2	0,1	7,4	20	0,042	0,01	0,54	110	0,56	24	0,1	400	
187	0,065	0,38	1,03	0,064	0,078	0,06	5,4	0,12	0,33	1,7	3,3	1,4	6,2	23	0,033	0,01	0,92	98	0,64	18	0,1	10	
202	0,16	0,32	1,08	0,075	0,076	0,054	5,4	0,14	0,6	1,8	3,5	1,3	7,2	41	0,034	0,01	0,93	104	2	19	3,5	150	
217	0,062	0,15	1,60	0,081	0,021	0,021	3,1	0,076	0,78	0,95	2,7	0,1	5,5	35	0,019	0,01	0,51	95	0,86	21	1,1	510	
232	0,072	0,18	1,70	0,078	0,033	0,025	4,1	0,088	0,57	1,1	2,1	0,1	5,2	38	0,047	0,01	0,59	115	0,05	9	0,1	17	
247	0,06	0,04	1,70	0,082	0,019	0,021	3,4	0,054	0,58	0,64	2,8	0,1	6,5	34	0,06	0,01	0,52	150	0,95	25	0,1	90	
262	0,24	0,12	1,80	0,07	0,032	0,024	3,5	0,07	0,74	1,2	3,3	0,1	11	54	0,042	0,01	0,57	102	1,1	21	0,1	75	
287	0,089	0,13	1,80	0,071	0,029	0,021	3,0	0,059	0,48	1,3	1,7	0,1	4,7	51	0,04	0,01	0,57	114	0,05	10	0,1	110	
292	0,079	0,14	1,80	0,072	0,027	0,02	2,8	0,049	0,49	1,2	1,9	0,1	5	49	0,034	0,01	0,57	113	0,54	14	0,1	58	
307	0,11	0,20	1,70	0,066	0,044	0,027	3,7	0,074	0,61	2,1	2,6	0,1	12	54	0,029	0,01	0,76	105	1,4	18	0,1	23	
322	0,15	0,18	2,10	0,071	0,038	0,026	3,6	0,071	0,81	2,4	3,4	0,1	12	77	0,034	0,01	0,7	117	1,3	15	5,8	48	
337	0,83	0,94	1,80	0,15	0,300	0,15	17,0	0,37	4,5	11	9,9	2,2	43	114	0,077	0,13	3,9	108	2,3	19	3,7	270	
352	1,59	3,10	1,70	0,34	0,900	0,56	36,0	0,96	6,9	25	22	6,8	65	191	0,11	0,11	10,4	107	3,6	10	1,4	68	
367	2,82	3,80	0,93	0,46	1,600	0,99	76,0	2,0	9,4	29	29	14	68	278	0,094	0,69	29	96	3,2	6	1,4	98	
372	3,09	3,40	0,72	0,38	1,150	0,87	83,0	1,8	10	32	30	14	63	287	0,09	0,71	32	114	6,3	5	0,1	1000	

Распределение химических элементов по разрезу Шерстобитовского торфяника

Table 4

Distribution of chemical elements along the Sherstobitovskiy peat bog section

Гор-т, см	Fe	Al	Ca	Mg	K	Na	Cr	Be	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Mn	Cd	Sb	Li	Sr	As	Hg	Au	Ag	
	%						мг/кг															мкг/кг	
5	0,17	0,46	0,32	0,071	0,1	0,069	4,4	0,13	0,77	3,1	4,1	36	11	18	0,53	0,53	1,1	41	0,01	72	3,9	68	
10	0,14	0,3	0,29	0,062	0,069	0,047	2,3	0,098	0,64	2,3	3,9	24	9	10	0,16	0,38	0,59	43	0,01	57	1,7	200	
15	0,13	0,25	0,3	0,069	0,055	0,037	1,5	0,096	0,79	2	2,8	16	6,5	8	0,09	0,25	0,49	45	1,2	48	0,1	1	
20	0,12	0,21	0,3	0,066	0,049	0,036	1,3	0,079	0,56	1,9	2,7	11	5,6	7	0,064	0,23	0,39	47	0,9	31	0,1	25	
35	0,13	0,22	0,47	0,089	0,036	0,042	1,6	0,069	0,77	1,8	2,3	4,1	5	8	0,049	0,12	0,49	70	0,75	41	4,4	25	
45	0,13	0,31	0,55	0,11	0,049	0,048	2,4	0,081	0,61	2	3	3,1	4,2	11	0,034	0,01	0,64	90	1,1	34	1,9	50	
60	0,12	0,36	0,58	0,13	0,053	0,057	2,3	0,11	0,65	2	3,7	3,2	3,6	11	0,18	0,01	0,72	95	0,84	19	1,2	12	
70	0,14	0,29	0,9	0,19	0,035	0,05	1,9	0,12	1,1	1,7	2,9	2,1	2,5	13	0,064	0,01	0,64	150	0,01	19	0,1	1	
80	0,15	0,26	1,1	0,22	0,027	0,033	1,7	0,09	0,83	2,2	2	1,2	1,4	10	0,05	0,01	0,61	190	0,89	24	0,1	32	
90	0,15	0,23	1,2	0,25	0,028	0,031	2	0,066	0,93	2,1	2,3	0,1	2	12	0,041	0,01	0,57	200	0,56	18	2,1	360	
105	0,17	0,28	1,5	0,33	0,053	0,042	3,5	0,081	1	3,3	4,6	0,1	3,8	24	0,15	0,01	0,89	220	1,3	18	18	61	
120	0,13	0,2	1,6	0,34	0,042	0,032	2,2	0,07	0,79	2,8	3,2	0,1	4,8	37	0,04	0,01	0,79	220	1,9	8	1,6	260	
135	0,23	0,25	1,5	0,35	0,05	0,036	2,3	0,069	0,83	3	3	0,1	7,1	45	0,036	0,18	0,85	210	0,81	13	13	110	
150	0,22	0,29	1,5	0,37	0,062	0,043	3,6	0,083	0,94	3,4	4	0,1	13	59	0,035	0,01	0,98	220	0,95	13	1,8	87	
165	0,32	0,29	1,6	0,38	0,064	0,047	2	0,082	0,92	3,4	3,9	0,1	12	84	0,036	0,01	1,1	240	0,67	14	1,9	56	
180	0,36	0,33	1,8	0,42	0,075	0,055	3,1	0,099	1,3	3,8	3,8	0,1	8,9	92	0,031	0,01	1,2	260	1	17	5,1	350	
195	0,27	0,28	1,9	0,44	0,056	0,043	3	0,084	1,2	3,1	3,3	1	7,4	119	0,034	0,10	1	290	1,2	11	0,1	60	
210	0,19	0,23	1,7	0,38	0,047	0,037	1,9	0,076	0,77	3,5	3,6	0,1	11	105	0,038	0,01	0,77	250	1,7	7	6,8	220	
225	0,17	0,26	1,7	0,41	0,053	0,044	2,5	0,085	0,95	4,1	4,3	0,1	12	104	0,017	0,12	0,85	250	1,3	14	0,1	130	
240	0,37	0,32	1,8	0,4	0,062	0,048	3	0,091	1,7	5,5	5	0,1	24	124	0,046	0,17	1	260	1,7	22	1,5	73	
245	0,56	0,38	1,8	0,41	0,082	0,06	2,6	0,12	2,2	6,8	8,6	0,1	28	123	0,069	0,21	1,1	260	1,9	17	0,1	57	
250	0,9	1,6	1,5	0,33	0,43	0,27	18	0,53	3	11	19	3,9	42	146	0,15	0,12	4,3	220	2,8	11	26	610	
255	1,1	2,7	1,3	0,4	0,73	0,49	26	0,8	3,9	15	29	4,5	54	188	0,3	0,27	7,4	170	3,1	17	5,5	750	
265	1,6	3,8	0,92	0,4	1,25	0,91	37	1,8	5	18	31	9,6	53	211	0,26	0,49	11	140	2,2	6	0,1	74	
275	1,7	5	0,75	0,4	1,56	1,1	35	1,5	4,6	16	21	11	49	201	0,15	0,52	15	120	1,9	21	4,3	340	

Верхние интервалы разреза Шерстобитовского торфяника характеризуются повышенными концентрациями халькофильных элементов As, Cd, Sb, Hg и Pb, в Убинском горелом торфянике кроме того добавляются еще Cu и Zn (см. табл. 3, 4). Так, для Убинского горелого торфяника в интервале 0–20 см отмечены концентрации Cu, равные 3,1–16,0 мг/кг, Zn – 40 мг/кг, As – 1,8–3,0 мг/кг, Cd – 0,11 мг/кг, Sb – 1,3 мг/кг, Hg – 0,02–0,04 мг/кг, Pb – 7,4–80,0 мг/кг. Для Шерстобитовского торфяника в интервале 0–10 см отмечены концентрации Cd в пределах 0,2–0,5 мг/кг, As – 0,01–1,2 мг/кг, Sb – 0,4–0,5 мг/кг, Hg – 0,05–0,07 мг/кг, Pb – 24–36 мг/кг. Повышение концентраций халькофильных элементов (Cu, Zn, As, Cd, Sb, Hg, Pb) в верхних интервалах исследованных торфяников можно связать с поступлением их из атмосферы в XX и XXI вв. как за счет природных, так и техногенных факторов [Гавшин и др., 2004; Бобров, Преис, Будашкина, 2013; Бобров и др., 2019].

Полученные аналитические данные по концентрациям химических элементов позволили выявить особенности обогащения ими торфа по глубине стратифицированных разрезов с помощью коэффициентов обогащения (Enrichment Factor – EF) в сравнении с подстилающими органоминеральными от-

ложениями и продуцентами органического вещества. Установлено обогащение (EF = 15,9–36,7) верхних горизонтов торфа халькофильными элементами Pb, Cd, Sb, As, Hg (рис. 3).

Так, для верхних горизонтов (0–22 см) Убинского горелого торфяника значения EF составляют: Pb (20,5), Cd (2,3), Sb (5,8), As (3,9), Hg (24,2). Для верхних горизонтов (5–70 см) Шерстобитовского торфяника значения EF составляют: Pb (15,9), Cd (11,3), Sb (3,4), As (1,4), Hg (36,7). Выявлено существенное обеднение верхних горизонтов торфа Mn: EF = 0,62 (Убинский горелый торфяник) и 0,34 (Шерстобитовский торфяник), а также Li: EF = 0,30 (Убинский торфяник) и 0,25 (Шерстобитовский торфяник). Средние горизонты торфяников характеризуются существенным обогащением Ca, для которого EF = 61,6 (Убинский горелый торфяник) и 29,2 (Шерстобитовский торфяник), Sr: EF = 29,7 (Убинский горелый торфяник) и 23,1 (Шерстобитовский торфяник), а также незначительно Mg: EF = 4,5 (Убинский горелый торфяник) и 7,1 (Шерстобитовский торфяник). Отмечается обеднение средних интервалов торфа Pb: EF = 1,71 (Убинский горелый торфяник) и 0,38 (Шерстобитовский торфяник).

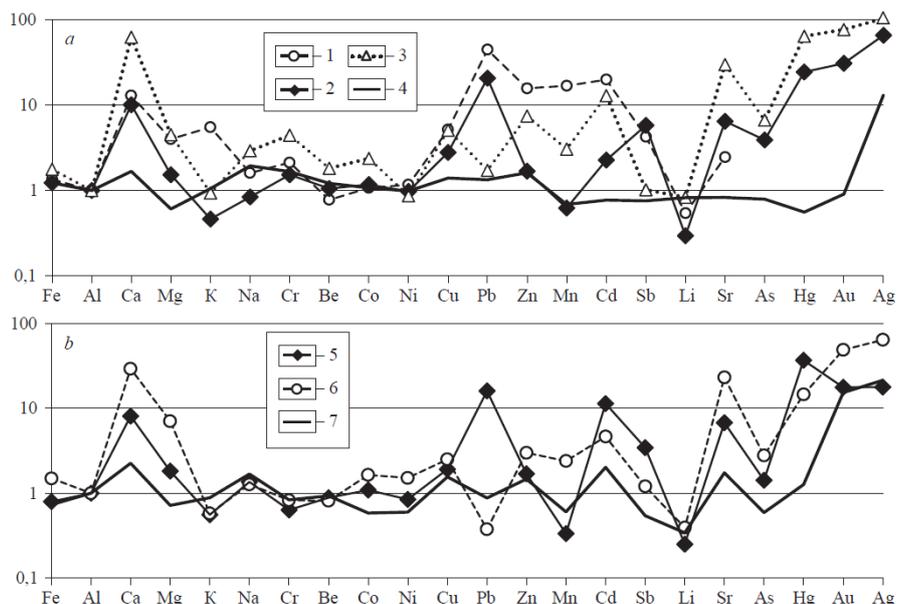


Рис. 3. Коэффициенты обогащения (EF) биопродуцентов и разных типов торфов химическими элементами относительно кларков глинистых сланцев с предварительным нормированием на Al

Убинское болото: 1 – мох *Sphagnum fuscum*, 2 – торф, 0–22 см, 3 – торф, 37–337 см, 4 – органоминеральные осадки, 352–372 см; Шерстобитовское болото: 5 – верховой торф, 5–70 см, 6 – низинный торф, 80–245 см, 7 – органоминеральные осадки, 250–265 см

Fig. 3. The enrichment factors (EF) of bioproducers and different types of peats in chemical elements relative to the clarkes of shales with preliminary normalization to Al

Ubinskoe bog: 1 – *Sphagnum fuscum* moss, 2 – peat, 0–22 cm, 3 – peat, 37–337 cm, 4 – organic-mineral sediments, 352–372 cm; Sherstobitovskoe bog: 5 – high moor peat, 5–70 cm, 6 – lowland peat, 80–245 cm, 7 – organomineral sediments, 250–265 cm

По всей глубине исследованных торфяников наблюдается обогащение Au и Ag, однако более глубокие интервалы (80–337 см) обогащены значительнее Au: EF = 76,1 (Убинский горелый торфяник) и 48,6 (Шерстобитовский торфяник), Ag: EF = 96,3 (Убинский горелый торфяник) и 63,7 (Шерстобитовский торфяник), чем вышележащие интервалы (0–70 см), где значения EF составляют для Au – 30,7 (Убинский горелый торфяник), 17,6 (Шерстобитовский торфяник) и для Ag – 65,1 (Убинский горелый торфяник), 17,7 (Шерстобитовский торфяник). При этом для Убинского горелого торфяника обогащение Au и Ag значительно выше, чем для Шерстобитовского торфяника. Для продуцентов органического вещества торфа Убинского горелого торфяника (мха *Sphagnum fuscum*) характерно обогащение Cu (7,6), Zn (27,7), Mn (16,7), Cd (19,7), Sb (4,3) и особенно Pb (72,6).

Химический состав атмосферных (дождевых) и болотных вод. В водном балансе верховых болот основное значение имеют атмосферные осадки. Поэтому, помимо химического состава болотных вод Убинского горелого, Большого Убинского и Шерстобитовского рямов, были исследованы дождевые воды.

Дождевые воды по преобладающим ионам, согласно классификации [Алекин, 1970], относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция (табл. 5), по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ($E_h = +0,335$ В, растворенный O_2 – 7,3 мг/л), по щелочно-кислотным условиям – к классу нейтральных ($pH = 6,54$), по величине общей минерализации (16,8 мг/л) – к семейству ультрапресных вод согласно [Перельман, 1982]. Биохимическое потребление кислорода (БПК₅ – показатель, характеризующий содержание легкоокисляемых органических веществ по количеству израсходованного на их окисление кислорода в течение 5 сут) составляло – 0,94 мг O_2 /л, ХПК – показатель, характеризующий суммарное содержание в воде трудноокисляемых органических веществ по количеству израсходованного на окисление кислорода – 8,9 мг O_2 /л. Окисляемость (бихроматная) – 3,76 мг/л.

Болотные воды Убинского горелого рьяма по преобладающим ионам, согласно [Алекин, 1970], относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция (табл. 5), по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ($E_h = +0,320$ В, раство-

ренный O_2 – 6,8 мг/л), по щелочно-кислотным условиям – к классу кислых ($pH = 4,59$), по величине общей минерализации (71,5 мг/л) – к семейству ультрапресных вод согласно [Перельман, 1982]. БПК₅ составляло 6,8 мг O_2 /л, ХПК – 922 мг O_2 /л. Окисляемость (бихроматная) – 224 мг/л.

Болотные воды Большого Убинского рьяма, находящегося вблизи с. Убинское в естественном состоянии (не нарушенном мелиорацией и пожарами), по преобладающим ионам, согласно [Алекин, 1970], относятся к гидрокарбонатному классу группе кальция (табл. 5), по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ($Eh = +0,278$ В, растворенный O_2 – 2,8 мг/л), по щелочно-кислотным условиям – к классу кислых ($pH = 3,73$), по величине общей минерализации (182,4 мг/л) – к семейству ультрапресных вод согласно [Перельман, 1982]. БПК₅ составляло 7,5 мг O_2 /л, ХПК – 565 мг O_2 /л. Окисляемость (бихроматная) – 216 мг/л.

Болотные воды Шерстобитовского рьяма по преобладающим ионам, согласно [Алекин, 1970], относятся к гидрокарбонатному классу группе кальция (табл. 5), по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ($Eh = +0,260$ В, растворенный O_2 – 4,7 мг/л), по щелочно-кислотным условиям – к классу кислых ($pH = 3,76$), по величине общей минерализации (43,0 мг/л) – к семейству ультрапресных вод согласно [Перельман, 1982]. БПК₅ составляло 5,5 мг O_2 /л, ХПК – 682 мг O_2 /л. Окисляемость (бихроматная) – 180 мг/л.

Низкие значения pH болотных вод обусловлены разложением органических веществ в аэробных условиях, приводящим к поступлению в воду CO_2 , фульвокислот и других органических кислот. Ниже по разрезу торфяных залежей деструкция органического вещества идет в анаэробных условиях, приводящих к снижению P_{CO_2} , что на фоне роста зольной компоненты, содержания Са и HCO_3^- , приводит к повышению pH до слабощелочных значений. Подщелачивание среды может осуществляться также за счет выделения NH_3 при минерализации микроорга-

низмами азотосодержащего органического вещества согласно [Юдович, Кетрис, 2011].

В процессе разложения растительных остатков в болотных водах исследованных торфяников происходит значительное увеличение концентраций растворенного органического углерода ($C_{орг}$), NH_4^+ , NO_3^- и показателей БПК, ХПК по сравнению с дождевой водой (табл. 5). Высокие содержания этих компонентов в болотных водах указывают на активные процессы биохимического распада и окисления органического вещества. Более высокие показатели ХПК, NH_4^+ и HCO_3^- в болотных водах Убинского горелого торфяника являются отражением развития этого верхового болота – оно в настоящий период является мезотрофным, а не олиготрофным, как Шерстобитовское болото, поэтому в него поступает больше органического вещества, что приводит к повышению значений ХПК, содержания аммонийного азота и т.д.

Другой немаловажной геохимической особенностью болотных вод является содержание в них сульфат-иона и растворенного железа. Концентрация ионов SO_4^{2-} в исследованных болотных водах невелика и составляет 0,5 мг/л (Шерстобитовское болото) и 2,6 мг/л (Убинское горелое болото) (табл. 5). Установленные нами довольно низкие концентрации SO_4^{2-} болотных вод являются геохимической характеристикой большинства верховых болот согласно [Лукашев и др., 1971]. При сравнении содержаний SO_4^{2-} в болотных водах исследованных торфяников следует отметить более высокие (в 5 раз) содержания SO_4^{2-} в болотных водах мезотрофного Убинского горелого болота.

Макроэлементы (Al, P, Fe, Ba и др.) и микроэлементы являются важнейшими компонентами гидрогеохимического своеобразия болотных вод согласно [Шварцев и др., 2012]. Болотным водам Убинского горелого, Большого Убинского и Шерстобитовского рьямов, а также дождевой воде, отобранной вблизи Убинского горелого рьяма (у с. Убинское), присущи следующие элементно-геохимические особенности (табл. 6).

Таблица 5

Химический состав дождевой и болотных вод Убинских и Шерстобитовского рьямов

Table 5

The chemical composition of the rain and bog waters of the Ubinsky and Sherstobitovsky ryams

Компонент	Убинский горелый рям	Большой Убинский рям	Шерстобитовский рям	Дождевая вода
pH	4,59	3,73	3,76	6,54
Eh , В	+0,320	+0,278	+0,260	+0,335
O_2 , мг/л	4,8	2,8	4,7	7,3
Окисляемость, мг/л	224	216	180	3,74
БПК ₅ , мг O_2 /л	6,8	7,5	5,5	0,94
ХПК, мг O_2 /л	922	565	682	8,9
HCO_3^- , мг/л	1,2	0,6	0,5	4,3

Компонент	Убинский горелый рям	Большой Убинский рям	Шерстобитовский рям	Дождевая вода
SO ₄ ²⁻ , мг/л	2,6	0,9	0,5	0,4
Cl ⁻ , мг/л	15,4	2,9	1,4	4,0
PO ₄ ³⁻ , мг/л	0,30	0,49	0,46	0,12
NO ₃ ⁻ , мг/л	0,56	16,1	9,4	0,21
NO ₂ ⁻ , мг/л	0,02	0,12	0,11	0,0007
Ca ²⁺ , мг/л	20,7	6,9	8,8	2,0
Mg ²⁺ , мг/л	4,1	2,4	2,7	0,24
Na ⁺ , мг/л	19,0	6,3	4,8	4,2
K ⁺ , мг/л	2,6	0,73	0,62	0,96
NH ₄ ⁺ , мг/л	5,0	145	13,7	0,37
Сумма, мг/л	71,5	182,4	43,0	16,8

Таблица 6

Химический микроэлементный состав дождевой воды и болотных вод Убинского горелого, Большого Убинского и Шерстобитовского рямов, мкг/л

Table 6

Chemical microelement composition of rainwater and bog waters of Ubinsky burned, Bolshoy Ubinsky and Sherstobitovsky ryam, µg / l

Элемент	Убинский горелый рям	Большой Убинский рям	Шерстобитовский рям	Дождевая вода
Li	5,8	4,7	3,2	0,1
Al	226,1	83,9	67,3	51,0
P	205,4	81,9	160,7	106,5
Ti	6,4	1,7	1,9	0,5
Cr	6,5	4,6	3,1	2,3
Mn	30,6	51,3	69,8	7,0
Fe	1405,7	986,5	913,9	73,6
Ni	30,2	14,6	15,6	3,7
Cu	20,6	49,7	99,6	5,6
Zn	239,8	90,2	110,3	150,5
As	112,5	<0,1	<0,1	<0,1
Sr	263,8	67,9	98,9	10,2
Ag	1,5	0,7	1,1	0,2
Hg	<0,03	<0,03	<0,03	0,09
Ba	903,4	28,3	35,9	7,8
Pb	27,1	19,8	19,9	17,6

Для болотных вод характерно повышенное содержание растворенного железа (хелатное Fe, связанное с органическим веществом) – 0,9 (Шерстобитовское болото) и 1,4 мг/л (Убинское горелое болото) в сравнении с дождевыми водами, питающими торфяники, где концентрации Fe значительно ниже (0,07 мг/л) (см. табл. 6). Источником Fe в болотных водах может быть диагенетическое преобразование глинистого материала зольной части торфяников согласно [Юдович, Кетрис, 2011]. О преобразовании глинистого материала (и, как следствие, перераспределении химических элементов по разрезам) может косвенно свидетельствовать уменьшение зольности в интервалах 20–40 см по сравнению с самыми верхними горизонтами (0–10 см) торфяной залежи (см. рис. 2).

Разрушение ряда минералов, а также фильтрация болотных вод через массу оторфованных растений приводят к повышению в болотных водах концентраций Al, Mn, Cu, Zn, Ti, Sr, Ba. Органическое ве-

щество играет большую роль в разрушении структур алюмосиликатных минералов и выносе алюминия согласно [Helmer, Urban, Eisenreich, 1990]. В условиях повышенной кислотности торфяных залежей Al становится подвижным и способен легко переходить в состав болотных вод из твердой фазы торфяников. На это указывают очень высокие концентрации Al в болотных водах в сравнении с дождевыми водами (табл. 6). Рост концентраций Mn в болотных водах, в сравнении с дождевой водой, связан с образованием комплексных соединений Mn с органическим веществом гуминового типа согласно [Voquete et al., 2011; Шварцев и др., 2012], что влияет на накопление Mn²⁺ в болотных водах.

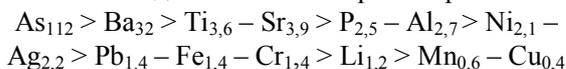
Следует отметить, что в болотных водах концентрации Hg ниже предела обнаружения метода, а в дождевой воде ее концентрация составляет 0,09 мкг/л. Вероятнее всего, Hg связывается в комплексы с гуминовыми кислотами согласно исследованиям [Веретенникова, Ляпина, 2015].

Оценка степени антропогенного загрязнения компонентов рямовых экосистем по комплексу геохимических критериев. Одним из принципиальных моментов при мониторинге загрязнения природной среды является выбор и обоснование критериев, с помощью которых оценивается степень изменения ее состояния. Традиционно об экологическом состоянии экосистем судят на основе сопоставления показателей общего валового содержания токсичных элементов, например тяжелых металлов, с величинами предельно-допустимых концентраций (ПДК). Однако для торфа и биологических объектов не существует разработанных ПДК. Поэтому определение степени загрязненности подобных объектов проводится путем сравнения их химического состава с таковым на незагрязненных (фоновых) территориях по комплексу геохимических критериев согласно [Сает, Ревич, Янин, 1990].

Были рассчитаны коэффициенты концентрации химических элементов (K_c) в болотных водах Убинского горелого рьяма, антропогенно нарушенного пожарами, относительно болотных вод Большого Убинского рьяма, принятых за условно-фоновые воды, поскольку рям находится в естественных природных условиях (табл. 7, рис. 4).

Используя полученные коэффициенты концентрации (K_c), был построен упорядоченный по значениям K_c ранжированный ряд химических элементов (геохимическая ассоциация – ФГА) в болотных водах Убинского горелого рьяма.

Болотные воды Убинского горелого рьяма:



Сравнительный анализ ФГА показывает, что самый высокий коэффициент концентрации установлен для экологически опасного элемента (активного воздушного мигранта) – As ($K_c = 112$). Для других элементов из этой же группы коэффициенты концентрации несравненно ниже: для Pb ($K_c = 1,4$), для Cu – ($K_c = 0,4$).

На пожарищах Убинского горелого рьяма были отобраны пробы сгоревших мхов, лесной подстилки (зола, сажа, мелкие угли) и верхнего слоя почвы, непосредственно попавших в зону выгорания, а также листья березы и брусничник – растений, произрастающих на выгоревших площадях. Аналогичные «сквозные» индикаторные биообъекты, а также лесная подстилка и верхний слой почвы были отобраны на фоновом участке. Рассчитаны коэффициенты концентрации (K_c) для 20 химических элементов в компонентах экосистемы Убинского горелого рьяма (табл. 8, рис. 5).

Таблица 7

Коэффициенты концентрации элементов (K_c) в болотных водах Убинского горелого рьяма относительно болотных вод Большого Убинского рьяма (фон)

Table 7

Concentration coefficient of elements (CC) in the swamp waters of Ubinsky Gorely ryam relatively to swamp waters of Bolshoy Ubinsky ryam (Environmental background)

Элемент	Li	Al	P	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Ag	Ba	Pb
Болотные воды	1,23	2,69	2,51	3,66	1,42	0,60	1,42	2,06	0,41	2,66	112	3,89	2,17	31,93	1,36

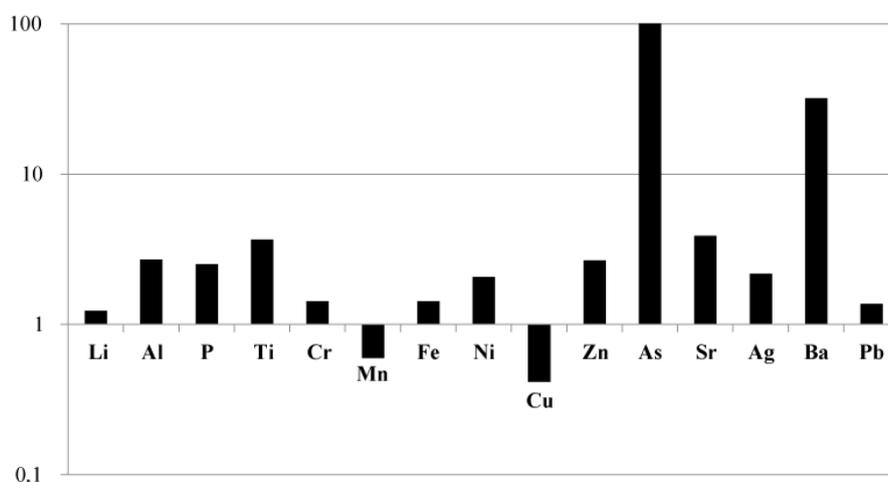


Рис. 4. Коэффициенты концентрации химических элементов (K_c) в болотных водах Убинского горелого рьяма

Fig. 4. Concentration coefficient of elements (CC) in the swamp waters of Ubinsky Gorely ryam

Коэффициенты концентрации элементов (K_c) в экосистеме Убинского горелого ряма

Concentration factors of elements (K_c) in the ecosystem of the Ubinsky burnt ryam

Объект	Fe	Al	Mg	K	Na	Mn	Ba	Sr	Zn	Co
<i>Sphagnum fuscum</i>	4,5	5,7	1,2	0,9	4,3	1,0	2,1	2,3	4,5	3,2
Брусничник	1,6	1,2	1,2	1,3	0,9	1,3	1,2	1,4	1,6	1,0
Лист березы	0,6	0,4	1,0	1,5	0,9	1,1	0,7	0,9	0,6	3,7
Лесная подстилка	3,6	1,7	1,3	1,9	1,7	1,8	2,6	2,1	3,6	4,5
Почва (0–5 см)	0,9	1,0	0,8	2,3	1,0	0,6	1,1	1,0	0,9	0,9
	Hg	Ni	Cu	Pb	Cr	V	Li	Cd	Sb	Be
<i>Sphagnum fuscum</i>	3,4	3,8	2,5	24,0	3,7	4,5	4,0	1,3	3,1	5,7
Брусничник	0,5	0,8	1,2	1,3	1,0	1,0	1,6	1,9	0,2	1,0
Лист березы	1,0	1,1	1,2	1,0	1,0	1,0	0,7	0,8	0,1	1,0
Лесная подстилка	1,8	3,7	2,3	3,2	2,9	17	3,0	2,1	4,7	1,8
Почва (0–5 см)	1,6	1,3	1,0	4,2	0,9	0,9	1,0	0,8	1,0	0,9

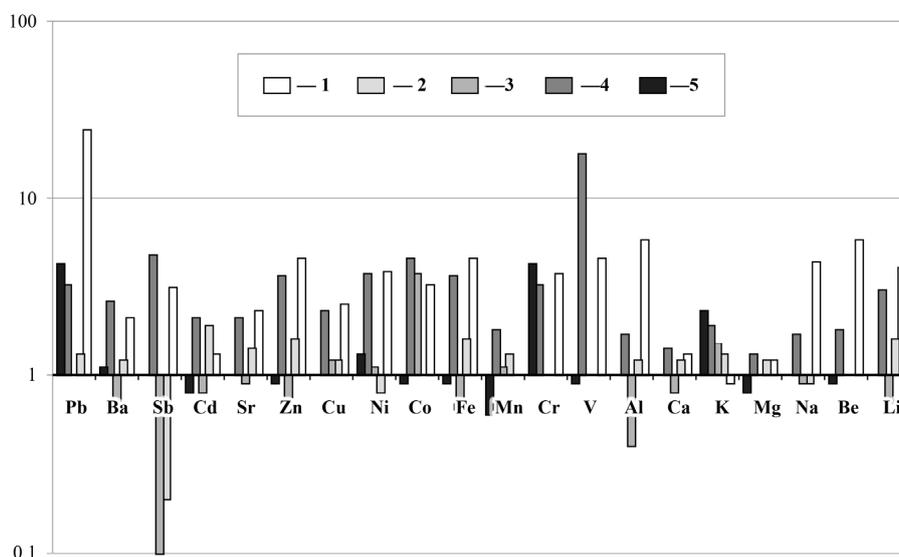


Рис. 5. Коэффициенты концентрации химических элементов (K_c) в компонентах экосистемы Убинского горелого ряма

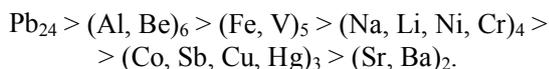
1 – мох *Sphagnum fuscum*, 2 – листья брусники, 3 – листья березы, 4 – лесная подстилка, 5 – верхний горизонт почвы

Fig. 5. Concentration factors of chemical elements (K_c) in the components of the Ubinsky burnt ryam

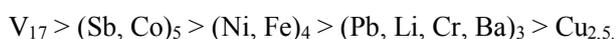
1 – *Sphagnum fuscum* moss, 2 – lingonberry leaves, 3 – birch leaves, 4 – forest litter, 5 – upper soil horizon

Используя полученные коэффициенты концентрации (K_c), были построены упорядоченные по значениям K_c совокупности (ранжированные ряды) химических элементов – формулы геохимических ассоциаций в «сквозных» индикаторных биообъектах (мох, брусничник, листья березы), лесной подстилке и верхнем горизонте почвы.

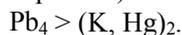
Мох *Sphagnum fuscum*:



Лесная подстилка:



Почва (верхний горизонт):



Для брусничника и листьев березы K_c не превышают фоновых концентраций всех химических элементов и близки к 1.

В целом сравнительный анализ значений K_c показывает, что во всех компонентах экосистемы Убинского горелого ряма интенсивно накапливаются халькофильные элементы – активные воздушные мигранты (Pb, Sb, Cu, Hg). Накопление этих элементов компонентами болотной экосистемы может являться следствием антропогенного воздействия (пожары) на верховое болото.

Заключение

Установлено, что исследованные торфяники Барабинской лесостепи неоднородны по вещественно-

му составу и состоят из слоев верхового и низинного типов торфа. Слой верхового торфа (0–257 см) Убинского горелого болота образован сфагновыми мхами (*Sphagnum fuscum*) с прослойками пирогенного переходного древесного торфа на поверхности залежи. Нижний слой торфяной залежи (257–347 см) образован различными видами низинных торфов – травяных, древесно-травяных, сфагновых. Возраст торфяной залежи оценивается в 5,6 ¹⁴C тыс. лет. Слой верхового торфа (0–70 см) Шерстобитовского болота образован сфагновыми мхами (*Sphagnum magellanicum*). Нижний слой (70–250 см) образован различными видами низинных травяных, древесно-травяных и сфагновых торфов. Возраст торфяной залежи оценивается в 4,5 ¹⁴C тыс. лет.

Выявлено, что неоднородность в распределении основных биогенных элементов по разрезам исследованных торфяников маркирует смену ботанического состава торфа на разных этапах формирования болот. Ранние периоды голоцена (2,7–5,6 ¹⁴C тыс. лет), в которых формировался низинный тип торфа, характеризуются повышенными содержаниями S и N в составе органического вещества торфяника. Для разрезов Убинского горелого и Шерстобитовского торфяников получены значимые коэффициенты корреляции отношения C/N и степени разложения ($r = -0,93$ и $-0,82$), а также отношения C/N и глубины залежи ($r = -0,61$ и $-0,76$), что подтверждает увеличение степени деструкции органического вещества с глубиной.

По коэффициентам корреляции все исследованные химические элементы хорошо разбиваются на группы. Первую группу составляют химические элементы, входящие в терригенную (обломочную) часть материала торфа – Li, Al, Na, K, Fe, Cr, Mn, Ni, для них характерна сильная прямая корреляция (до

0,98%) с распределением зольности по разрезам. Они характеризуются относительно устойчивым увеличением концентраций от поверхности торфяников вглубь разреза к минеральным отложениям с ярко выраженным максимумом в минеральных отложениях, что обусловлено повышением их зольности. Вторую группу составляют Ca, Sr, частично Mg. Эти химические элементы характеризуются резким увеличением концентраций в средних и нижних интервалах, представленных низинным торфом. Третья группа – халькофильные элементы Pb, Sb, Hg, Cu, Zn, As, характеризующие загрязненность современной атмосферы. Для них характерны хорошо выраженные максимумы концентраций в верхних интервалах торфяников.

Оценка загрязненности болотных вод Убинского горелого рьяма относительно фоновых болотных вод Большого Убинского рьяма по геохимическим критериям – коэффициентам концентрации (K_c) и ФГА показывает, что самый высокий коэффициент концентрации установлен для экологически опасного элемента (активного воздушного мигранта) – As ($K_c = 112$). Для других элементов из этой же группы коэффициенты концентрации несравненно ниже: для Pb ($K_c = 1,4$), для Cu – ($K_c = 0,4$).

Сравнительный анализ значений коэффициентов концентрации (K_c) исследованных компонентов экосистемы Убинского горелого рьяма (лесная подстилка, верхний горизонт почвы, «сквозные» индикаторные биообъекты – мох, брусничник и лист березы) указывает на интенсивное накопление в них халькофильных элементов (активных воздушных мигрантов – Pb, Sb, Cu, Hg). Накопление этих элементов компонентами болотной экосистемы может являться следствием антропогенного воздействия на верховые болота при пожарах.

Список источников

- Авессаломова И.А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1987. 108 с.
- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л. : Гидрометеоздат, 1970. 444 с.
- Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция и железа в вертикальном профиле торфяных залежей таежной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323, № 1. С. 173–178.
- 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. Т. 22, № 1. С. 20–29.
- Бобров В.А., Будашкина В.В., Мельгунов М.С., Леонова Г.А., Мальцев А.Е. Природные и техногенные радиоизотопы и микроэлементы в разрезе торфяной залежи верхового болота Дулиха (Прибайкалье): ретроспективные оценки атмосферного поступления минерального вещества // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2019. № 2 (38). С. 93–102.
- Веретенникова Е.Э. Содержание и распределение химических элементов в торфах южнотаежной подзоны Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 89–95.
- Веретенникова Е.Э., Ляпина Е.Е. Содержание и некоторые аспекты поведения ртути в торфяных залежах олиготрофного грядово-мочажинного комплекса на юге Западной Сибири // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : материалы Второй Всерос. конф. Владивосток : Дальнаука, 2015. С. 336–339.
- Гавшин В.М., Бобров В.А., Сухоруков Ф.В., Будашкина В.В., Мельгунов М.С. Фракционирование химических элементов в атмосфере Западной Сибири: данные по омбротрофному торфянику // Доклады Академии наук. 2004. Т. 396, № 6. С. 804–807.

ГОСТ Р 57162-2016. Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией. М. : Стандартинформ, 2016. 19 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.

Леонова Г.А., Копотева Т.А., Меленевский В.Н., Мальцев А.Е., Климин М.А., Бобров В.А. Методический подход к выявлению источников и генезиса захороненного органического вещества на примере голоценовых разрезов озерных сапропелей // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 11. С. 1602–1626.

Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слуга З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. В.Б. Куваева. Тула : Гриф и К°, 2001. 584 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. 284 с.

Науомов А.В., Косых Н.П., Паршина Е.К., Артымук С.Ю. Верховые болота лесостепной зоны, их состояние и мониторинг // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16, № 2. С. 251–25.

Перельман А.И. Геохимия природных вод. М. : Наука, 1982. 154 с.

ПНД Ф 14.1:2.96–97. Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в пробах природных и очищенных сточных вод аргентометрическим методом. Ростов н/Д : Государственный комитет РФ по охране окружающей среды, 2004. 19 с.

ПНД Ф 14.1:2.159–2000. Методика выполнения измерений массовой концентрации сульфат-ионов в пробах природных и сточных вод турбидиметрическим методом. М. : ФЦАО, 2005. 11 с.

Прейс Ю.И., Бобров В.А., Сороковенко О.Р. Особенности современной аккумуляции минерального вещества на олиготрофных болотах юга лесной зоны Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2010а. № 336. С. 204–210.

Прейс Ю.И., Бобров В.А., Будашкина В.В., Гавшин В.М. Оценка потоков минерального вещества по свойствам торфяных отложений Бакчарского болота (южная тайга Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. 2010б. Т. 316, № 1. С. 47–43.

РД 52.24.493–2006. Массовая концентрация гидрокарбонатов и величина щелочности поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Методика выполнения измерений титриметрическим методом. Ростов н/Д : Гидрохимический институт, 2006. 37 с.

Савичев О.Г. Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 4. С. 47–57.

Савичев О.Г., Шмаков А.В. Вертикальная зональность и внутригодовые изменения химического состава вод Тимирязевского болота (Томск, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета, 2012. Т. 320, № 1. С. 156–172.

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, 2019. Т. 330, № 9. С. 184–194.

Саэт Ю.Е. Антропогенные геохимические аномалии (особенности, методика изучения и экологическое значение) : автореф. дис... д-ра геол.-минерал. наук. М. : ИМГРЭ, 1982. 53 с.

Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М. : Недра, 1990. 335 с.

Степанова В.А., Волкова И.И. Особенности генезиса Николаевского яра в лесостепи Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2017. № 40. С. 202–223.

Хазин Л.Б., Хазина И.В., Кривоногов С.К., Кузьмин Я.В., Прокопенко А.А., Бурр Дж. С. Климатические изменения на юге Западной Сибири в голоцене по результатам анализа ассоциаций остракод // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 4. С. 729–742.

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.

Юдович Я.Э., Кегрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар : Геопринт, 2011. 742 с.

Янин Е.П. Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы изучения). М. : ИМГРЭ, 2002. 52 с.

Boquete M.T., Fernández J.A., Aboal J.R., Carballeira A. Are terrestrial mosses good biomonitors of atmospheric deposition of Mn // Atmospheric Environment. 2011. V. 45. P. 2704–2710.

Borgmark A. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis // Holocene. 2005. V. 15 (3). P. 387–395.

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. V. 25, No. 2. P. 259–278.

Helmer E.H., Urban N.R., Eisenreich S.J. Aluminum geochemistry in peatland waters // Biogeochemistry. 1990. V. 9, No. 3. P. 247–276.

Kempton H., Krachlera M., Shoty 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. V. 78. P. 19–25.

Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Miroshnichenko. Biogeochemistry of holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia) // Applied Geochemistry. 2021. V. 124. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811

Li Y.H. Distribution patterns of the elements in the ocean: A synthesis // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. V. 55. P. 3223–3240.

Malawskaand M., Wilkomirski B. Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east of Poland) // Soil Science Plant Nutrition. 2004. V. 50, No. 6. P. 925–930.

Savichev O.G. Distribution of inorganic pollutants over the depth of upper peat deposit // Contemporary Problems of Ecology. 2015. V. 8, No. 1. P. 118–124.

Shotyk W., Cheburkin A.K., Appleby P.G., Fankhauser A., Kramers J.D. Two thousand years of atmospheric arsenic, antimony and lead deposition in an ombrotrophic bog profile, Jura Mountains, Switzerland // Earth and Planetary Science Letter. 1996. V. 145. P. 1–7.

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. V. 65, No. 14. P. 2337–2360.

Steinmann P., Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland) // Chemical Geology. 1997. V. 138. P. 25–53.

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. V. 53. P. 53–70.

References

Avessalomova I.A. *Geokhimicheskiye pokazateli pri izuchenii landshaftov* [Geochemical indicators in the study of landscapes]. Moscow: Moscow University Press, 1987. 108 p. In Russian

Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p. In Russian

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. V. 323, No. 1. pp. 173–178. In Russian

Bobrov V.A., Preis Yu.I., Budashkina V.V. Estimation of mineral matter fluxes from the atmosphere based on the trace element composition of the peat deposit of the high bog Bakchar-1 (southern taiga of Western Siberia) // Problems of biogeochemistry and geochemical ecology. 2013. V. 22. No. 1. pp. 20–29. In Russian

Bobrov V.A., Budashkina V.V., Melgunov M.S., Leonova G.A., Maltsev A.E. Natural and technogenic radioisotopes and microelements in the context of the peat deposit of the Dulikha bog (Cisbaikalia): retrospective estimates of the atmospheric input of mineral matter // Geology and Mineral Resources of Siberia. 2019. No. 2 (38). pp. 93–102. In Russian

Veretennikova E.E. Content and distribution of chemical elements in peats of the southern taiga subzone of Western Siberia // Geography and natural resources. 2013. No. 2. pp. 89–95. In Russian

Veretennikova E.E., Lyapina E.E. *Soderzhaniye i nekotoryye aspekty povedeniya rtuti v torfyanykh zalezkhk oligotrofnogo gryadovo-mochazhinnogo kompleksa na yuge Zapadnoy Sibiri* [Content and some aspects of the behavior of mercury in peat deposits of the oligotrophic ridge-hollow complex in the south of Western Siberia] // Geological evolution of the interaction of water with rocks: Proceedings of the Second All-Russian Conference. Vladivostok: Dalnauka Publishing House, 2015. pp. 336–339. In Russian

Gavshin V.M., Bobrov V.A., Sukhorukov F.V., Budashkina V.V., Melgunov M.S. Fractionation of chemical elements in the atmosphere of Western Siberia: data on the ombrotrophic peat bog // Doklady Earth Sciences. 2004. V. 396. No. 6. pp. 804–807. In Russian

GOST R 57162–2016. *Voda. Opredeleniye soderzhaniya elementov metodom atomno-absorbtsionnoy spektrometrii s elektrotermicheskoy atomizatsiyey* [Water. Determination of the content of elements by atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization]. Moscow: Standartinform, 2016. 19 p. In Russian

Efremova T.T., Efremov S.P., Kutsenogiy K.P., Onuchin A.A., Peresedov V.F. Biogeochemistry of Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U in a low-lying peat bog between the Ob and Tom rivers // Pochvovedenie. 2003. No. 5. pp. 557–567. In Russian

Leonova G.A., Kopoteva T.A., Melenevsky V.N., Maltsev A.E., Klimin M.A., Bobrov V.A. Methodological approach to identifying the sources and genesis of buried organic matter on the example of Holocene sections of lacustrine sapropels // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2019. V. 60. No. 11. pp. 1602–1626. In Russian.

Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka 3.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N K. *Bolotnyye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoye znachenie* [Swamp systems of Western Siberia and their nature conservation value] / Editor: Professor V.B. Kuvaev. Tula: Grif i K^o, 2001. 584 p. In Russian

Lukashev K.I., Kovalev V.A., Zhukhovitskaya A.L., Khomich A.A., Generalova V.A. *Geokhimiya ozerno-bolotnogo litogeneza* [Geochemistry of lacustrine-bog lithogenesis]. Minsk: Science and technology, 1971. 284 p. In Russian

Naumov A.V., Kosykh N.P., Parshina E.K., Artymuk S.Yu. Upper bogs of the forest-steppe zone, their condition and monitoring // Siberian ecological journal. 2009. V. 16. No. 2. pp. 251–25. In Russian

Perelman A.I. *Geokhimiya prirodnykh vod* [Geochemistry of natural waters]. Moscow: Nauka, 1982, 154 p. In Russian

PND F 14.1: 2.96–97. *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii khloridov v probakh prirodnykh i ochishchennykh stochnykh vod argentometricheskim metodom* [Methods for measuring the mass concentration of chlorides in samples of natural and treated wastewater by the argentometric method]. Rostov-on-Don: State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection, 2004. 19 p. In Russian

PND F 14.1: 2.159–2000. *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii sul'fat-ionov v probakh prirodnykh i stochnykh vod turbidimetricheskim metodom* [Methods for measuring the mass concentration of sulfate ions in samples of natural and waste waters by the turbidimetric method]. Moscow: FGU "FTSAO", 2005. 11 p. In Russian

Preis Yu.I., Bobrov V.A., Sorokovenko O.R. Features of modern accumulation of mineral matter on oligotrophic bogs in the south of the forest zone of Western Siberia // Tomsk State University Journal. 2010a. No. 336. pp. 204–210. In Russian

Preis Yu.I., Bobrov V.A., Budashkina V.V., Gavshin V.M. Estimation of mineral matter flows by the properties of peat deposits of the Bakcharsk bog (southern taiga of Western Siberia) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2010b. V. 316. No. 1. pp. 47–43. In Russian

RD 52.24.493-2006. *Massovaya kontsentratsiya gidrokarbonatov i velichina shchelochnosti poverkhnostnykh vod sushy i ochishchennykh stochnykh vod. Metodika vypolneniya izmereniy titrimetricheskim metodom* [Mass concentration of bicarbonates and

- alkalinity of land surface waters and treated wastewaters. Methods for performing measurements by titrimetric method]. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute, 2006. 37 p. In Russian
- Savichev O.G. Geochemical indicators of bog waters in the taiga zone of Western Siberia // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2015. No. 4. pp. 47–57. In Russian
- Savichev O.G., Shmakov A.V. Vertical zoning and intra-annual changes in the chemical composition of the waters of the Timiryazev bog (Tomsk, Western Siberia) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012. V. 320. No. 1. pp. 156–172. In Russian
- Savichev O.G., Nalivaiko N.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K. Microbiological conditions for the distribution of chemical elements along the depth of peat deposits in the ecosystems of the eastern part of the Vasyugan bog (Western Siberia) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2019. V. 330. No. 9. pp. 184–194. In Russian
- Saet Yu.E. *Antropogennyye geokhimicheskiye anomalii (osobennosti, metodika izucheniya i ekologicheskoye znachenie)* [Anthropogenic geochemical anomalies (features, study methods and ecological significance)]. Author's abstract. dis.... Dr. geol.-min. sciences. Moscow: IMGRE, 1982. 53 p. In Russian
- Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow: Nedra, 1990. 335 p. In Russian
- Stepanova V.A., Volkova I.I. Features of the genesis of the Nikolaev ryam in the forest-steppe of Western Siberia // *Tomsk State University Journal of Biology*. 2017. No. 40, pp. 202–223. In Russian
- Khazin L.B., Khazina I.V., Krivonogov S.K., Kuzmin Ya.V., Prokopenko A.A., Burr J.S. Holocene climate changes in southern West Siberia based on Ostracod analysis // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2016. V. 57, No. 4, pp. 729–742. In Russian
- Shvartsev S.L., Serebrennikova O.V., Zdvizhkov M.A., Savichev O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of bog waters in the lower part of the Tom basin (south of the Tomsk region) // *Geochemistry*. 2012. No. 4. pp. 403–417. In Russian
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimicheskiye indikatoriy litogeneza (litologicheskaya geokhimiya)*. [Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry)]. Syktyvkar: Geoprint, 2011. 742 p. In Russian
- Yanin E.P. *Tekhnogennyye geokhimicheskiye assotsiatsii v donnykh otlozheniyakh malykh rek (sostav, osobennosti, metody izucheniya)* [Technogenic geochemical associations in bottom sediments of small rivers (composition, features, methods of study)]. Moscow: IMGRE, 2002. 52 p. In Russian
- Boquete M.T., Fernández J.A., Aboal J.R., Carballeira A. Are terrestrial mosses good biomonitors of atmospheric deposition of Mn // *Atmospheric Environment*. 2011. V. 45. pp. 2704–2710.
- Borgmark A. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis // *Holocene*. 2005. V. 15(3). pp. 387–395.
- 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. V. 25. No. 2. pp. 259–278.
- Helmer E.H., Urban N.R., Eisenreich S.J. Aluminum geochemistry in peatland waters // *Biogeochemistry*. 1990. V. 9. No. 3. pp. 247–276.
- Kempton H., Krachlera M., Shotyk 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. V. 78, pp. 19–25.
- Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Miroshnichenko. Biogeochemistry of holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia) // *Applied Geochemistry*. 2021. V. 124. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104811>
- Li Y.H. Distribution patterns of the elements in the ocean: A synthesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. V. 55. pp. 3223–3240.
- Malawskaand M., Wilkomirski B. Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east of Poland) // *Soil Science Plant Nutrition*. 2004. V. 50, No 6. pp. 925–930.
- Savichev O.G. Distribution of inorganic pollutants over the depth of upper peat deposit // *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. V. 8. No 1. pp. 118–124.
- Shotyk W., Cheburkin A.K., Appleby P.G., Fankhauser A., Kramers J.D. Two thousand years of atmospheric arsenic, antimony and lead deposition in an ombrotrophic bog profile, Jura Mountains, Switzerland // *Earth and Planetary Science Letter*. 1996. V. 145. pp. 1–7.
- 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 Grue're, 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. V. 65. No. 14. pp. 2337–2360.
- Steinmann P., Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland) // *Chemical Geology*. 1997. V. 138, pp. 25–53.
- 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. V. 53. pp. 53–70.

Информация об авторах:

Леонова Г.А., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: leonova@igm.nsc.ru

Мальцев А.Е., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

Преис Ю.И., кандидат биологического наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геоинформационных технологий, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: preisuyi@rambler.ru

Бобров В.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.
E-mail: bobr@igm.nsc.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Leonova G.A., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.
E-mail: leonova@igm.nsc.ru

Maltsev A.E., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia
E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

Preis Yu.I., Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia.
E-mail: preisyui@rambler.ru

Bobrov V.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Laboratory of Geochemistry of Radioactive Elements and Ecogeochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.
E-mail: bobr@igm.nsc.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.08.2021; одобрена после рецензирования 10.11.2021; принята к публикации 06.11.2022

The article was submitted 17.08.2021; approved after reviewing 10.11.2021; accepted for publication 06.11.2022