

Element composition of peat deposits in flat frost mound bogs of the Pyakupur River (northern taiga of West Siberia)

A.G. Lim, S.V. Loyko, T.V. Raudina, I.I. Volkova, V.P. Seredina

Tomsk State University

Lenina prospekt, 36, Tomsk 634050, Russia. E-mail: lim_artiom@mail.ru

Submitted: 16.11.2017. Accepted: 28.12.2017

The content and the profile distribution of the element composition of the 1 meter high peat deposits in flat frost mound bogs are investigated. The botanical composition of peat is described. The results of the botanical composition analysis of peat showed that deposits consist mainly of sphagnum mosses, lichens, shrubs, green mosses, pine wood, as well as pine and birch bark. A good correlation between the degree of peat decomposition and the brightness of dry peat measured by the CIE L*a*b* color model is revealed. As a result of the study of peat samples' color, it has been found that this parameter can be used as an express method for the rapid assessment of peat degree decomposition. The highest concentration of the organic carbon occurs at the base of the peat deposit ($64.4 \pm 0.2\%$). The nitrogen concentration in permafrost peat is higher than in thawed ($1.0 \pm 0.2\%$ and $0.7 \pm 0.1\%$, respectively, the difference is significant at $p = 0.001$). The C / N ratio decreases from 72 ± 16 in 0-40 cm in the thawed layer to 50 ± 10 in the frozen part (40-100 cm). Within the bottom low boundary of the seasonally thawed layer, a local increase in the N concentration was detected, as well as an almost 2-fold decrease in the C/N ratio. It is most likely related to the high increase in the rate of microbial activity on the border between the thawed layer and the permafrost peat. It was revealed that most of the elements are concentrated in the upper (thawed) part of the peat deposit. Among them, only Na, Mg, Ca, Zn, Ba, As and Sb have a significant difference. Despite the fact that significant differences according to non-parametric U-criterion Mann-Whitney test were identified only for 7 elements, the distribution of the rest along elements the frozen and thawed peat layer is similar in nature. So for Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, Fe, Zn, Ba, Li, B, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, Cs, the upper quartiles of concentrations in the seasonally thawed layer are 1.2 - 6.9 times higher than in the permafrost peat, and for C, N, Al, Ba, B, V, Co, Cu, Zr, Nb, Mo it is 1,0 - 0,6 times lower, respectively. Generally, according to the element composition, it is safe to say that the differences stem from the botanical composition. In general, according to the elemental composition it can be said that the differences are primarily due to the botanical composition. The active layer comprises mainly sphagnum mosses and lichens, the woody peat already appears in the lower permafrost part of the deposit. A correlation between the brightness of peat and the total content of ash elements ($R^2 = 0.65$, excluding 1 sample) was revealed within the active layer. Taking into account the fact that the brightness correlates with the degree of decomposition, it may be concluded that higher upper quartile of the concentrations of elements in the active layer relates to the slower peat accumulation rate for the last 3 thousand years and, correspondingly, a large accumulation of dust components from the atmosphere by the peat layers.

Key words: flat frost mound bog; element composition; Western Siberia; carbon; soils

Элементный состав торфяной залежи плоскобугристого мерзлого болота бассейна реки Пякупур (северная тайга Западной Сибири)

А.Г. Лим, С.В. Лойко, Т.В. Раудина, И.И. Волкова, В.П. Середина

Томский государственный университет

Ленина проспект, 36; 634050, Томск, Томская область, Россия. E-mail: lim_artiom@mail.ru

Изучено содержание и профильное распределение химических элементов в торфяной залежи и подстилающих минеральных горизонтах плоскобугристого болота с мощностью торфяной залежи 1 м. Описан ботанический состав торфа. Выявлена корреляция между степенью разложения торфа и его яркостью в сухом состоянии, измеренной в цветовой модели CIE L*a*b*. Показано, что содержание Na, Mg, Ca, Zn, Ba, As и Sb в торфе достоверно выше в верхней (талой) половине торфяной залежи. Также, отмечено увеличение концентрации большинства элементов (K, P, Ca, Al, Fe) в верхней талой части залежи, при больших коэффициентах вариации (кроме Ca), чем в нижней, мерзлой толще. Для Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, Fe, Zn, Ba, Li, B, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, Cs верхние квартили концентраций в сезонно-талом слое в 1,2 – 6,9 раза выше, чем в многолетнемерзлом торфе, а для C, N, Al, Ba, B, V, Co, Cu, Zr, Nb, Mo в 1,0 – 0,6 раза ниже, соответственно.

Ключевые слова: мерзлые плоскобугристые болота; элементный состав; Западная Сибирь; углерод; почвы

Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к оценке воздействия наблюдаемых изменений климата на различные компоненты ландшафтов и потоки химических элементов в них. Как известно (IPCC, 2013), наибольшее потепление ожидается в северных регионах планеты, что в условиях распространения многолетней мерзлоты приведёт к существенной трансформации экосистем. Ландшафты криолитозоны Западной Сибири характеризуются значительной заболоченностью, преобладают по площади мерзлые бугристые болота в лесной зоне и полигональные в тундровой (Novikov et al., 2009). Их торфяная залежь, в условиях ограниченного участия грунтовых вод в зоне многолетнемерзлых пород, играет решающую роль в формировании элементного состава органических и органоминеральных коллоидов водоёмов, дренирующих болотные массивы (Pokrovsky et al., 2016). При дальнейшем потеплении будет увеличиваться объём деятельного слоя болот, что приведёт к увеличению роли торфяной залежи в формировании гидрохимических параметров поверхностных вод заболоченных водосборов. В связи с этим становится актуальной оценка содержания, форм и запасов химических элементов в торфяных залежах мерзлых болот, для чего и выполнена данная работа.

Материалы и методы исследования

Среди мерзлых болот в криолитозоне Западной Сибири наибольшая площадь приходится на плоскобугристые болота, поэтому для начала всестороннего изучения элементного состояния торфяных залежей были выбраны мерзлые плоскобугристые болота северной тайги Западной Сибири. Образцы торфов и подстилающих отложений отбирали в двух аналогичных точках, приуроченных в микрорельефе к межмочажинным повышенным частям мерзлых болот (плоские бугры). Почвы в местах отбора диагностированы как торфяные олиготрофные остаточно-мезотрофные мерзлотные по классификации почв России 2004 и Dystric Epifibric Endohemic Cryic Histosols по WRB 2014 (IUSS, 2014). Растительность представлена мохово-кустарничково-лишайниковыми сообществами (рис. 1). Поверхность исследуемых участков, где были проведены исследования, нанобугорковатая (перепады 20–30 см), на багульниковых нанобугорках мерзлота начинается с глубины 35–60 см, в некоторых межбугорковых пространствах формируются замкнутые депрессии в мерзлом горизонте глубиной до 40–50 см (диаметр в пределах 1 м). Имеются свежие просадки торфа, в которых наблюдается вымокание лишайникового напочвенного покрова, что свидетельствует о довольно активной динамике нанорельефа, отражающиеся в чередовании торфяных слоев различных степеней разложения и ботанического состава.

Основной исследуемой колонкой является керн из скважины СК14-4 (координаты: 63°47'50"; 75°33'22"). Нанорельеф: склон нанобугорка, превышение 25 см. Образцы отобраны из керна, полученного путём механизированного бурения установкой УКБ-2. Шаг отбора составлял 5 см, либо меньше, в случае контрастного ботанического состава. Мощность торфа 1 м. Мерзлота с 43 см. В теплые годы к концу сентября деятельный слой может увеличиться ещё на 10–15 см. Анализ элементного состава проведён во всем керне, длиной 140 см. Торфяная колонка подстилается средне-крупнозернистыми песками с незначительной примесью пылеватых и илистых фракций (до 5–6%). Среднее содержание углерода в подстилающих минеральных горизонтах составляет в среднем 1,65% с колебаниями от 0,03% (гор. Е), до 4,6% в бывшем иллювиально-гумусовом горизонте ВН. Дополнительная колонка отобрана из скважины СК14-2 (координаты: 63°47'22"; 75°35'30"). Нанорельеф: просадка между нанобугорками. Мощность торфа 87 см. Мерзлота с 70 см. Анализ проведён в образцах из талой толщи, отобранных на следующих глубинах: 0–10; 20–30; 40–50; 50–65; 65–80 см.

В пробах определялась потеря при прокаливании, путём сжигания образца в муфельной печи. Окраску торфа измеряли на спектрофотометре *X-Rite VS450* в цветовой модели CIE L*a*b*. Содержание азота и углерода в пробах торфа была измерена путём Cu-O каталитического сжигания при 900 °C с $\leq 0.5\%$ точностью к стандарту (*Thermo Flash 2000 CN Analyzer*). Для определения элементного состава образцы предварительно подвергались кислотному разложению и затем были проанализированы на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS (Agilent 7500 ce).

Обработку аналитических данных проводили с использованием пакета программы *MS Excel 2016* и *Statistica 12*.



Рисунок 1. Озерно-болотные ландшафты междуречий северной тайги Западной Сибири: 1 – термокарстовое озеро; 2 – осоково-пушицево-сфагновая мочажина; 3 – плоскобугристое болото.

Результаты и их обсуждение

Территория исследований характеризуется довольно монотонным строением песчаных отложений, подстилающих мерзлые болота, что связано с историей их формирования и существенной переветренностью в позднем плейстоцене (Velichko et al., 2011). По результатам анализа придонного слоя торфа, формирование торфяной залежи на рассматриваемом массиве началось 9983 ± 157 лет назад (ИМКЭС 14С-1214) и связано с автохтонным заболачиванием обширного плоского междуречья. Влияние натечных вод отсутствовало на всех этапах развития торфяной залежи. Из-за этого в период активного торфонакопления междуречные болота имели схожий режим трофности, что вызвало формирование торфа близкого ботанического состава на значительных территориях междуречий бассейна Пура (Novikov et al., 2009). Как отмечено в работе В.А. Сепановой (Stepanova et al., 2015) повсеместно в торфяной залежи преобладают осоковые, осоково-гипновые, сфагновые и гипновые виды торфов с большой примесью в верхнем слое вересковых кустарничков, а в нижележащих слоях – древесных остатков, хвоща, местами вахты, шейхцерии, пушицы. Степень разложения по всей толще залежи изменяется в пределах 5–30%, в придонном слое местами достигает 35–50%. Изложенное, а также сходимость данных по двум колонкам, позволяют предположить репрезентативность полученных данных.

На основе анализа литературных источников (Panova et al., 2010; Maksimova, Ospennikov, 2012; Ponomareva et al., 2012; Pastukhov et al., 2016), а также собственных полевых наблюдений, историю развития рассматриваемого болотного массива можно представить следующим образом. В суббореальный и атлантический периоды шло активное торфонакопление. Исходная поверхность этих атлантических болот характеризовалась относительно слабо выраженным микрорельефом, торфяная залежь в пределах этих микроформ различалась не существенно. Это были относительно плоские евтрофно-мезотрофные болота.

В начале суббореального периода голоцена (после 4,5 тыс. лет назад) они начали промерзать, причем как в Западной Сибири, так и на северо-западе Европейской России. Торфонакопление сильно затормозилось. Далее в субатлантическом периоде началась релаксация, мерзлота стала оттаивать, оформились мочажины и топи, просела поверхность, а бугры дополнительно приподнялись, за счёт формирования прослоек льда у основании залежи. Это по принципу положительной обратной связи усиливало дифференциацию болотного микрорельефа. Часто рост бугров за счёт ледяных сегрегаций приводил, как бы к разрыву/расползанию торфяного плаща, при его незначительной мощности, в местах «расползшегося» торфа оформлялись мочажины. Зачастую именно поэтому в них меньше мощность торфа.

Ниже рассмотрим аналитические данные по скважине СК14-4. Степень разложения торфа в ней увеличивается от верхней части торфяной залежи к нижней: с 5–10% вверху до 10–20% в пределах глубин 40–60 см, а ниже возрастает до 30–45%.

Результаты анализа ботанического состава торфа показали, что залежь в основном состоит из сфагновых мхов, лишайников, кустарничков, зеленых мхов, древесины сосны, а также коры сосны и березы (Рис. 2).

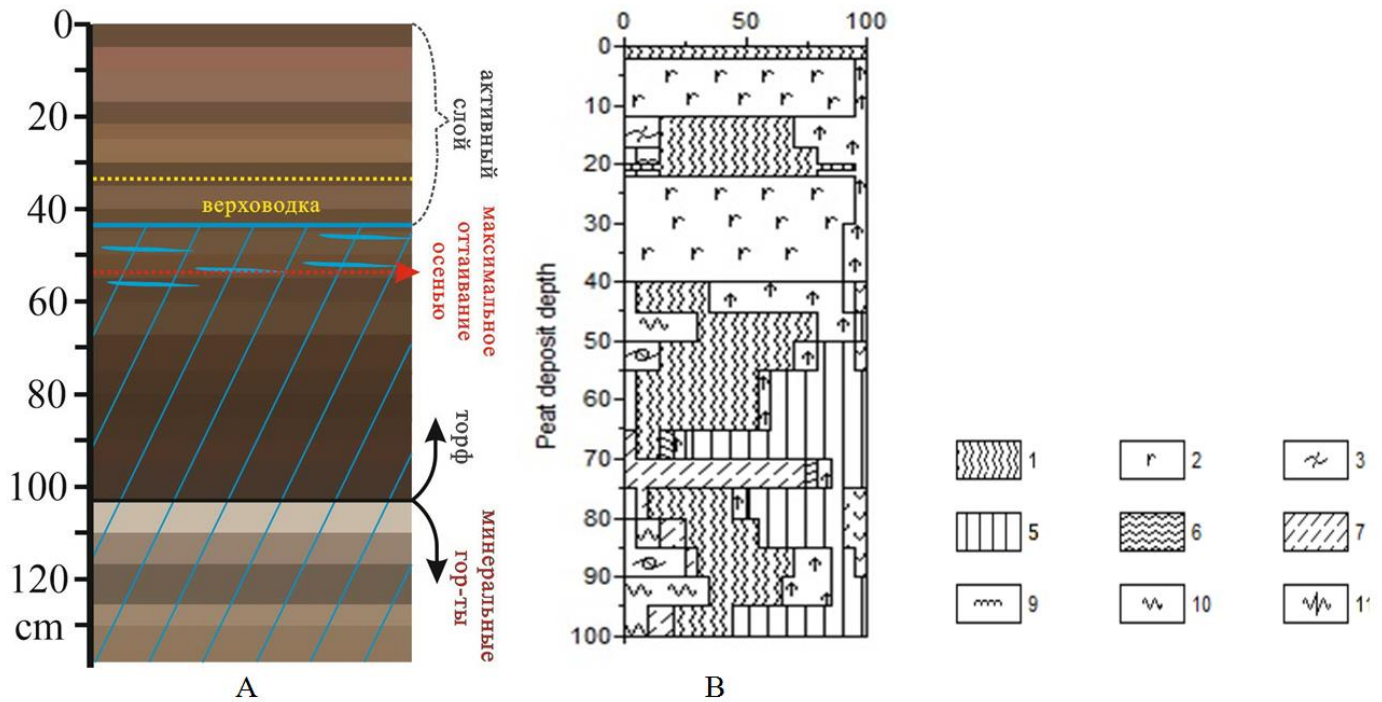


Рисунок 2. Схема строения почвенного профиля и его окраска (в соответствии с полученными цветовыми координатами образцов) (А) и ботанический состав торфяной залежи (В).

Обозначения: 1 – лишайники (*Cladonia stellaris*, *Cladonia stygia*); 2 – *Sphagnum rubellum*; 3 – *Sphagnum sp.*; 4 – кустарнички; 5 – деревья; 6 – *Eriophorum sp.*; 7 – зеленые мхи; 8 – *Sphagnum sect. Cuspidata*; 9 – *Sphagnum magellanicum*; 10 – *Sphagnum sect. Acutifolia*; 11 – *Sphagnum fuscum*; 12 – неопознанные остатки трав.

Сфагнумы и лишайники доминируют в диапазоне 0–40 см, лишайники и кустарнички преобладают на глубинах от 40 до 55 см, а лишайники и древесина деревьев присутствуют в диапазоне 60–100 см. На глубине 45–55 см встречены угольки, что свидетельствует о возможном выгорании части торфа. Наличие таких прослоев характерно для всех изученных торфяных почв рассматриваемой территории. В верхней и нижней частях залежи встречены песчаные частицы, которые могли появиться при развеивании песка с берегов озёр, имеющих песчаное дно.

Результаты измерения окраски образцов торфа приведены на Рис. 3. Видно, что к нижней части торфяной залежи окраска становится более гомогенной, уменьшается светлота (яркость) образцов. Коэффициент «+b» имеет большие величины (Рис. 3В), чем «+a» (Рис. 3Б), а значит, преобладают желтые тона, торф бурой окраски, лишь на глубинах 5–10 см появляется красновато-коричневый торф. Была определена степень разложения образцов торфа. Оказалось, что этот полуколичественный (глазомерный) параметр хорошо коррелирует с величиной светлоты (Рис. 3Г). В связи с чем координату «С» можно использовать как косвенный параметр для экспресс-оценки степени разложения торфа. Более того, учитывая высокую степень субъективности в определении степени разложения, можно предположить и возможно большую величину R^2 , в случае применения методов снижения субъективности, например, при перекрестном определении степени разложения несколькими специалистами.

Величина потери при прокаливании (ПП), концентрации углерода и азота приведены на рис. 4. От середины торфяной залежи ПП несколько уменьшается к верхней и нижней её частям, что связано с наличием в среднем диапазоне песчаных зёрен. Несистематические вариации содержания углерода и азота наблюдались с глубиной по всему керну, с пиком концентрации N около 80 см и резким уменьшением содержания в минеральных горизонтах. Наибольшие концентрации органического углерода наблюдаются у основания торфяной залежи ($64,4 \pm 0,2\%$). Концентрация азота в многолетнемерзлом торфе выше, чем в талом ($1,0 \pm 0,2\%$ и $0,7 \pm 0,1\%$, соответственно, разница значима при $p=0,001$).

Отношение C/N снижается с 72 ± 16 в 0–40 см талого слоя к 50 ± 10 в мерзлой части (40–100 см). В пределах нижней границы сезонно-талой толщи выявлено локальное увеличение концентрации N, а также почти 2-кратное уменьшение отношения C/N (Рис. 4). Вероятнее всего это связано с тем, что на границе сезонно-талого слоя (СТС) и многолетнемерзлого торфа (ММТ), как было показано в работе Моргалёва с соавторами (Morgalev et al., 2017), происходит резкое увеличение микробной активности. Несмотря на то, что имеется равное отношение количества аэробных жизнедеятельных клеток в СТС и ММТ, в СТС наблюдается снижение микробной активности, что свидетельствует о его истощенности. Микробная активность в зоне вечной мерзлоты является немаловажным фактором, оказывающим существенное влияние на цикл органического углерода и азота в условиях изменения климата (Akerman, H.J., Johansson, M. 2008). В работе В.А. Степановой (Stepanova et al., 2015) было показано, что талые болота Западной Сибири имеют тенденцию постепенного снижения концентрации химических элементов от дна торфяной залежи к её поверхности. Для проверки наличия подобного тренда для изученного болота нами были рассчитаны средние значения концентраций, стандартные отклонения и коэффициенты вариации для сезонно-талого слоя (СТС) (0–40 см) и многолетнемерзлого торфа (ММТ) (40–100 см) залежи, вскрытой скважиной СК14-4 (табл. 1).

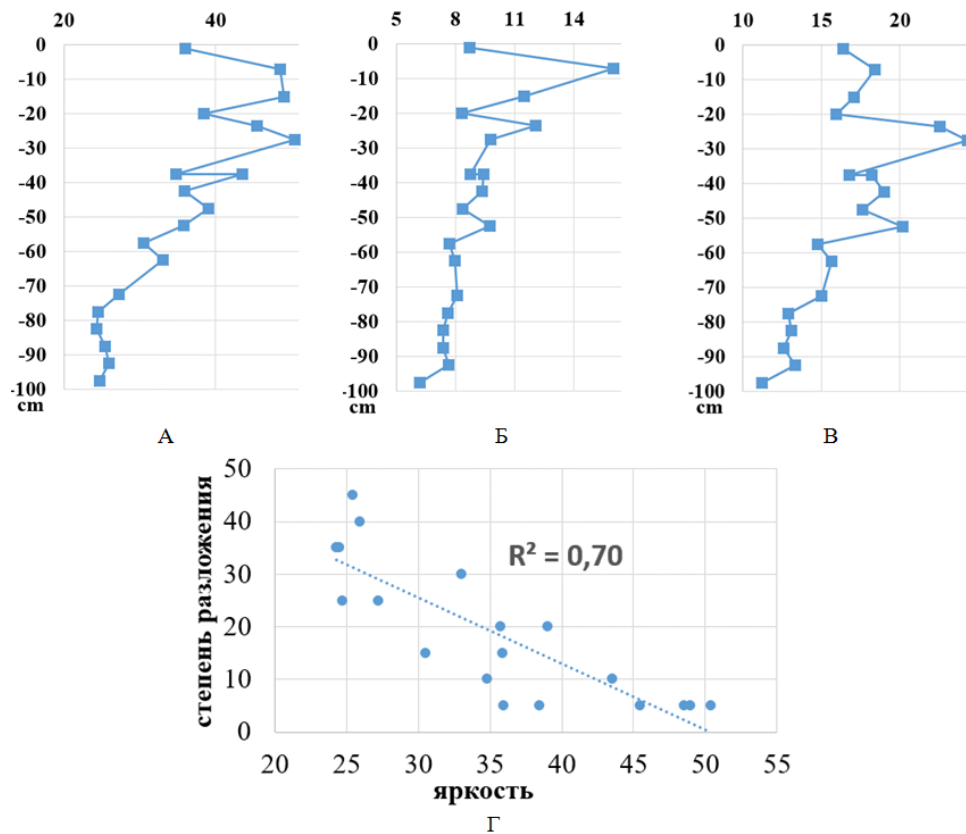


Рисунок 3. Колористические параметры сухого торфа в цветовой модели CIE L*a*b* и связь со степенью разложения: А – светлота (коорд. С); Б – координата «+а»; В – координата «+b»; Г – связь между яркостью (координата С) и степенью разложения торфа.

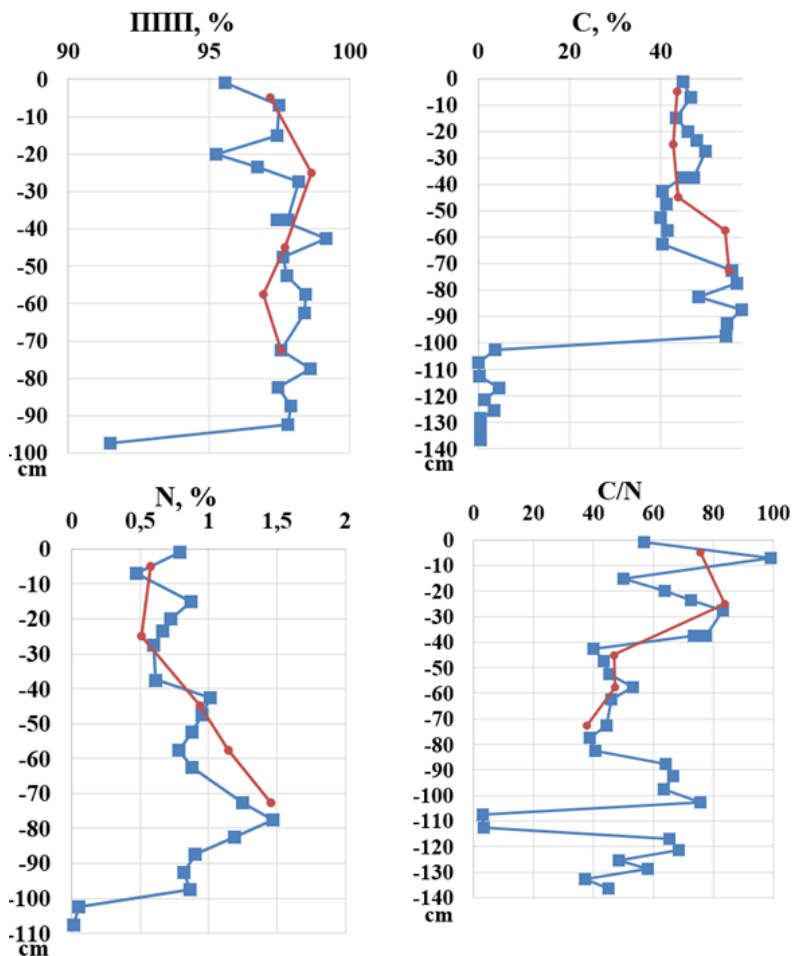


Рисунок 4. Потеря при прокаливании, величина C/N, содержание углерода и азота в торфяной залежи плоскобугристого болота (скважина Ск14-4 – синяя линия; скважина Ск14-2 – красная линия).

Оказалось, что средние значения содержания многих элементов в СТС выше, чем в ММТ (табл. 1). Однако статистически значимые различия с использованием U-критерия Манна-Уитни ($p < 0.05$) для концентраций элементов в СТС и ММТ были выявлены лишь для 7 элементов: N, Na, Mg, Ca, Zn, Ba, As, Nb и Sb. При этом Na, Mg, Ca, Zn, As и Sb имеют статистически достоверно большее содержание в СТС, чем ММТ, а концентрации N, Ba и Nb наоборот, достоверно выше в ММТ. Однако несмотря на наличие достоверных различий лишь для 9 элементов утверждаем, что различия средних имеют физический смысл. Чтобы продемонстрировать это мы сравнили значения верхних квартилей концентраций рассматриваемых элементов для СТС и ММТ. Результаты приведены в таблице. Для Na, Mg, Al, P, K, Ca, Ti, Fe, Zn, Li, B, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, Cs верхние квартили концентраций в сезонно-талом слое в 1,2 – 6,9 раза выше, чем в многолетнемерзлом торфе, а для C, N, Al, Ba, B, V, Co, Cu, Zr, Nb, Mo в 1,0 – 0,6 раза ниже, соответственно. То есть экстремумы 2/3 изученных элементов приурочены к верхней части торфяной залежи. С одной стороны, это обогащение связано с биологическим контролем распределения элементов в органогенных горизонтах, как это известно для других регионов (Reimann et al., 2005). Однако эти экстремумы не связаны с поверхностью торфяной почвы и скорее всего имеют иную природу.

Таблица 1. Сравнение концентраций химических элементов в сезонно-талом слое и многолетнемерзлом торфе залежи плоскобугристого болота (скважина СК14-4).

| Элемент | Единица измерения | Сезонно-талый слой (0-40 см) | | | Многолетнемерзлый торф (40-100 см) | | | U критерий Манна-Уитни $p < 0.05$ | | Отношение верхнего квартиля в СТС к верхнему квартилю ММТ |
|-----------|-------------------|------------------------------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|------------|-----------------------------------|--------------|---|
| | | Ср. знач.* | Стд. откл.* | Козф. вар.* | Ср. знач. | Стд. откл. | Козф. вар. | U-test | p-level | |
| N | | 0,67 | 0,12 | 19 | 1,00 | 0,21 | 21 | 4 | 0,001 | 0,7 |
| C | | 46,3 | 2,1 | 4 | 48,2 | 7,6 | 16 | 41 | 0,836 | 0,9 |
| ПП | | 97,0 | 1,1 | 1 | 97,5 | 2,0 | 2 | 19 | 0,043 | 1,0 |
| Na | | 203 | 164 | 81 | 60 | 32 | 53 | 8 | 0,003 | 3,0 |
| Mg | | 413 | 151 | 36 | 182 | 43 | 24 | 2 | 0,001 | 2,5 |
| Al | ppm | 1487 | 1060 | 71 | 2186 | 1001 | 46 | 24 | 0,107 | 0,9 |
| P | | 285 | 123 | 43 | 210 | 45 | 21 | 26 | 0,148 | 1,3 |
| K | | 522 | 391 | 75 | 265 | 91 | 34 | 21 | 0,063 | 2,3 |
| Ca | | 1432 | 383 | 27 | 1001 | 280 | 28 | 14 | 0,015 | 1,6 |
| Ti | | 94 | 93 | 98 | 80 | 40 | 49 | 37 | 0,591 | 1,5 |
| Fe | | 984 | 669 | 68 | 543 | 212 | 39 | 32 | 0,342 | 2,7 |
| Zn | | 17,9 | 3,6 | 20 | 10,8 | 4,8 | 44 | 9 | 0,004 | 1,7 |
| Ba | | 18,8 | 12,6 | 67 | 33,3 | 16,0 | 48 | 16 | 0,023 | 0,7 |
| Li | | 438 | 309 | 71 | 376 | 136 | 36 | 42 | 0,901 | 1,3 |
| B | | 4555 | 1042 | 23 | 6090 | 3707 | 61 | 33 | 0,386 | 0,7 |
| V | 2000 | 1584 | 79 | 2335 | 872 | 37 | 26 | 0,148 | 1,0 | |
| Cr | 3709 | 2482 | 67 | 2989 | 882 | 30 | 43 | 0,967 | 1,6 | |
| Mn | 8726 | 6859 | 79 | 3824 | 2543 | 66 | 24 | 0,107 | 3,3 | |
| Co | 308 | 108 | 35 | 331 | 145 | 44 | 40 | 0,773 | 0,9 | |
| Ni | 1854 | 1168 | 63 | 1512 | 792 | 52 | 39 | 0,710 | 1,7 | |
| Cu | 1788 | 1566 | 88 | 2503 | 1886 | 75 | 30 | 0,265 | 0,7 | |
| As | ppb | 1067 | 682 | 64 | 329 | 116 | 35 | 18 | 0,035 | 1,2 |
| Sr | | 9714 | 3514 | 36 | 9607 | 3540 | 37 | 38 | 0,650 | 4,2 |
| Y | | 414 | 309 | 75 | 401 | 94 | 23 | 38 | 0,650 | 2,5 |
| Zr | | 2070 | 1780 | 86 | 2883 | 2609 | 90 | 29 | 0,231 | 1,4 |
| Nb | | 356 | 210 | 59 | 727 | 283 | 39 | 12 | 0,009 | 1,2 |
| Mo | | 122 | 50 | 41 | 127 | 65 | 51 | 42 | 0,901 | 1,0 |
| Cd | | 134 | 67 | 50 | 87 | 27 | 31 | 22 | 0,076 | 0,6 |
| Sb | | 214 | 240 | 112 | 36 | 12 | 33 | 10 | 0,006 | 0,8 |
| Cs | | 115 | 119 | 104 | 58 | 24 | 41 | 39 | 0,710 | 1,8 |

*ср. знач. – среднее значение; стд. откл. – стандартное отклонение; коэф. вар. – коэффициент вариации

Суммарное количество зольных элементов в сезонно-талом слое коррелирует с яркостью торфа (Рис. 5), а яркость, в свою очередь, со степенью разложения (см. Рис. 3Г). Степень же разложения связана со временем пребывания торфа у поверхности почвы, а, соответственно, со скоростью торфонакопления. Иными словами, чем медленнее происходит накопления торфа, тем больше в нём зольных элементов.

С одной стороны, это может быть связано с биоаккумуляцией, но учитывая очень низкую биомассу растительности и то, что она представлена в основном мхами и лишайниками, не имеющими корневых систем, напрашивается вывод о накоплении элементов благодаря аэрозольным выпадениям.

Более того, при биоаккумуляции накапливаются потенциально подвижные и способные к выщелачиванию элементы, поэтому в ходе диагенеза биоаккумулятивные пики торфяной стираются. Аэрозольные выпадения чаще представлены нерастворимыми частицами, поэтому в торфяной залежи их элювирование происходит медленнее. Торфяная залежь сезонно-талого слоя формировалась последние 3–4 тыс. лет. Это время существования в степной зоне культур эпохи бронзы, которые способствовали генерации пыли в больших объемах, чем в предшествующие эпохи голоцена. Вторым источником аэрозольных выпадений могли являться лесные и торфяные пожары, которые по нашим неопубликованным данным существенно активизировались последние 4–2 тыс. лет назад. При пожарах с восходящими потоками воздуха в атмосферу выбрасывается существенное количество пепловых частиц, а также золы. Зола хорошо растворима и может захватываться мхами и лишайниками, причем этот перехват может быть эффективнее, чем захват из почвенных горизонтов, так как у них нет корней. Такие элементы как ванадий и хром считают индикаторами осаждения атмосферной пыли, также указывают на реальность формирования элементного состава под управлением аэрального привноса (Shotyk et al., 2002; Krachler et al., 2003).

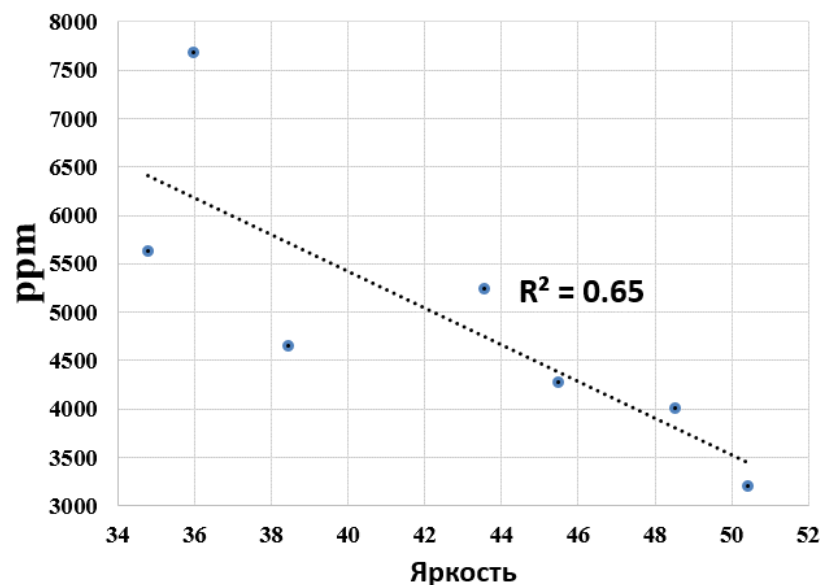


Рисунок 5. Связь между яркостью сухого торфа и содержанием зольных элементов в СТС колонки СК14-4.

Обратная картина наблюдается для Al, Ba, B, V, Co, Cu, Zr, Nb и Mo. Средние концентрации этих элементов выше в ММТ. Так, содержание Al в сезонно-талом слое составляет 1487 ppm, а в многолетнемерзлом слое 2186 ppm (рис. 6), аналогично для B – 4555 и 6090 ppm, для V – 2000 и 2335 ppm. Концентрация P в мерзлой и талой частях залежи существенно не отличаются (285 и 210 ppm).

Наибольшая концентрация K и Al приурочена к бывшему иллювиальному горизонту, что указывает на некоторое накопление в нём алюмосиликатов на этапах педогенеза, предшествовавших торфонакоплению. Наибольшие концентрации K, P, Fe приурочены к глубинам 15–20 см, а также к верхней части торфяной залежи. Это может быть связано как с биологической аккумуляцией, так и с ботаническим составом торфа, который здесь представлен лишайниковым типом (Peteet et al., 1998; De Caritat et al., 2001; Gonzalez et al., 2014).

Талая часть торфяной залежи характеризуется большими коэффициентами вариации значений концентрации элементов, чем мерзлая: для Al 71% и 46%, P 43% и 21%, K 75% и 34%, Fe 68% и 39%, соответственно. При подсчёте этих величин не учитывался придонный образец торфа.

Эти показатели характеризуют большую временную изменчивость условий торфонакопления при образовании верхних слоёв торфа, что связано с формированием криогенного нанорельефа, характеризующегося существенной пространственно-временной динамикой. В настоящее время вблизи скважины имеется много нанопросадок с замощенным лишайником – динамика мельчайших форм рельефа продолжается до сих пор, способствуя формированию слоистых торфяных отложений.

Колонка сравнения СК14-2 показывает в целом аналогичные результаты и профильные кривые, за исключением фосфора, для которого характерны более высокие концентрации с глубин ниже 40 см, по сравнению с колонкой СК14-4.

Совпадение особенностей элементного состава двух изученных колонок свидетельствует о репрезентативности полученных результатов, а также о том, что увеличение верхних квартилей концентраций в верхней части торфяной залежи связано не с локальными причинами, а закономерностями формирования элементного состава плоскобугристых болот и большой ролью аэрозольных выпадений.

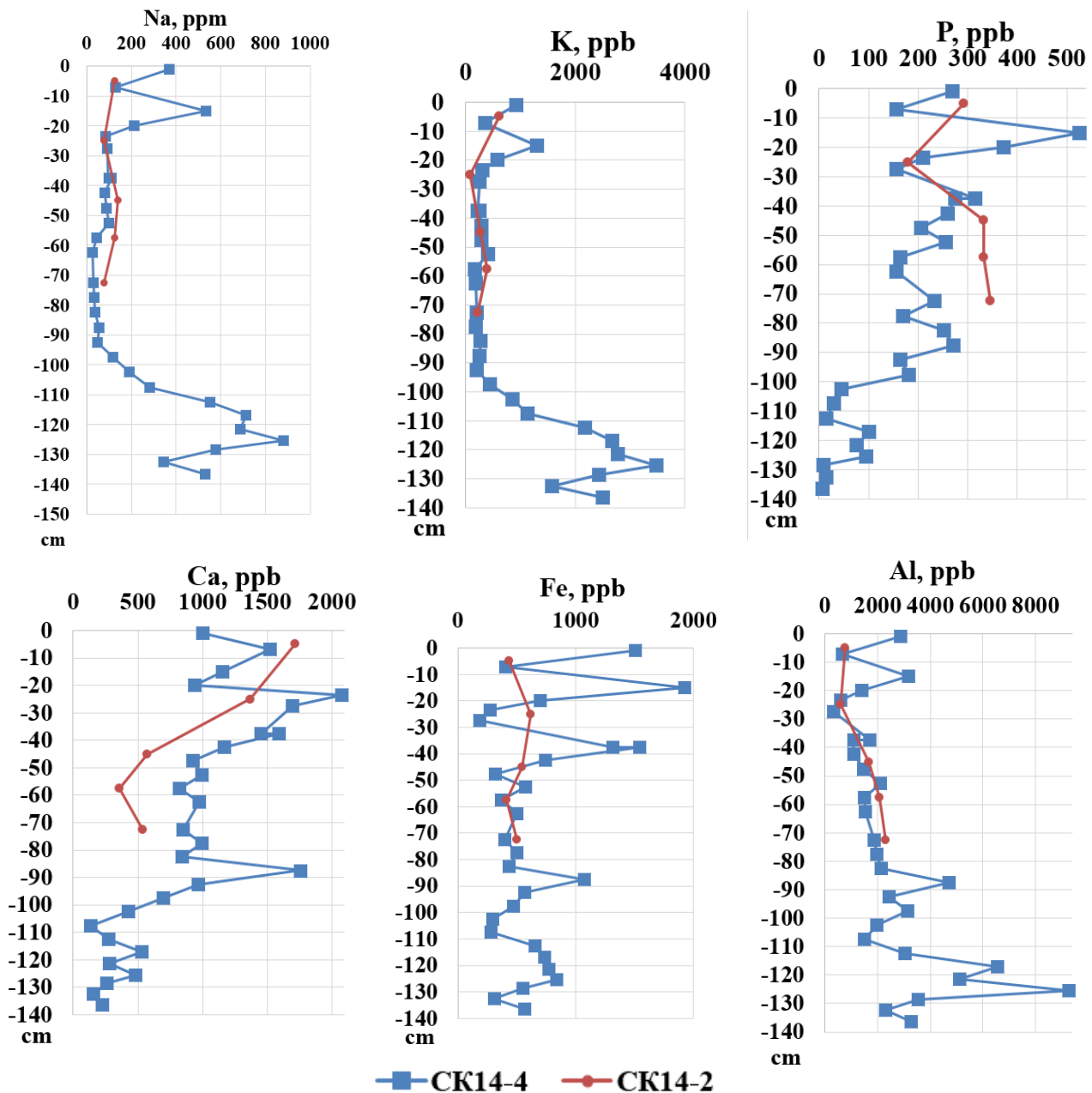


Рисунок 6. Профильные распределения концентраций изученных элементов в торфяных колонках.

Выводы

Проведенные исследования показали выраженные различия в элементном составе мерзлой и талой частей торфяной залежи плоскобугристого болота. В отличие от болот без многолетней мерзлоты, расположенных южнее, в изученных нами наблюдается в среднем большая концентрации K, Ca и Fe и других элементов в верхней части торфяной залежи, чем нижней. Талые же болота характеризуются наличием тренда к уменьшению концентраций элементов к верхней части торфяной колонки (Stepanova et al., 2015). Включение мерзлых слоёв торфа в деятельный слой при потеплении климата не должно привести к высвобождению дополнительных количеств P, K, Ca и Fe, так как их концентрации в мерзлых слоях плоскобугристых болот ниже, чем в вышележащих талых. В целом по элементному составу можно сказать что различия прежде всего обусловлены ботаническим составом. Верхняя часть, СТС, представлен преимущественно сфагновыми мхами и лишайниками, в нижней части залежи, ММТ, уже появляется древесный торф.

Благодарности

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки, России, 1.8195.2017/9.10.

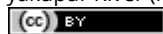
References

- Åkerman, H. J., & Johansson, M. (2008). Thawing permafrost and thicker active layers in subarctic Sweden. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(3), 279-292. DOI: 10.1002/ppp.626.
- De Caritat, P., Reimann, C., Bogatyrev, I., Chekushin, V., Finne, T. E., Halleraker, J. H., Äyräs, M. (2001). Regional distribution of Al, B, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, Na, P, Rb, Si, Sr, Th, U and Y in terrestrial moss within a 188,000 km² area of the central Barents

- region: influence of geology, seaspray and human activity. *Applied geochemistry*, 16(2), 137-159. DOI: 10.1016/S0883-2927(00)00026-3.
- González, A. G., & Pokrovsky, O. S. (2014). Metal adsorption on mosses: toward a universal adsorption model. *Journal of colloid and interface science*, 415, 169-178. DOI: 10.1016/j.jcis.2013.10.028.
- IPCC. (2013). Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections (van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)). In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IUSS Working Group WRB. (2014). World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Krachler, M., Mohl, C., Emons, H., & Shotyk, W. (2003). Atmospheric deposition of V, Cr, and Ni since the Late Glacial: effects of climatic cycles, human impacts, and comparison with crustal abundances. *Environmental science & technology*, 37(12), 2658-2667. DOI: 10.1021/es0263083.
- Maksimova, L.N., Ospennikov, E.N. (2012). Evolution of mire systems and permafrost of Bolshezemelskaya tundra in Holocene. *Kriosfera Zemli*, XVI(3), 53-61 (in Russian).
- Morgalev, Y.N., Morgaleva, T.G., Morgalev, S.Y., Lushchaeva, I.V., Kolesnichenko, L.G., Loiko, S.V., Krickov, I.V., Lim, A., Raudina, T.V., Volkova, I.I., Vorobyev, S.N., Kirpotin, S.N., Shirokova, L.S., Pokrovsky, O.S. (2017). Bacteria primarily metabolize at the active layer/permafrost border in the peat core from a permafrost region in western Siberia. *Polar Biology*, 40(8), 1645-16597. DOI: 10.1007/s00300-017-2088-1.
- Novikov, S.M., Moskvina, Y.P., Trofimov, S.A., Usova, L.I., Batuev, V.I., Tumanovskaya, S.M., Smirnova, V.P., Markov, M.L., Korotkevich, A.E., and Potapova, T.M. (2009). Hydrology of bog territories of the permafrost zone of western Siberia, BBM publ. House, Saint Petersburg (in Russian).
- Panova, N.K., Antipina, T.G., Gilev, A.V., Trofimova, S.S., Zinoviev, E.V., Erokhin, N.G. (2010). Holocene dynamics of vegetation and ecological conditions in the Southern Yamal Peninsula according to the results of comprehensive analysis of a relict peat bog deposit. *Russian Journal of Ecology*, 41(1), 20-27 (in Russian).
- Pastukhov, A.V., Marchenko-Vagapova, T.I., Kaverin, D.A., Goncharova, N.N. (2016). Genesis and evolution of peat plateaus in the sporadic permafrost area in the European North-East (middle basin of the Kosyu river). *Earth's Cryosphere*, XX(1), 3-13 (in Russian).
- Peteet, D., Andreev, A., Bardeen, W., & Mistretta, F. (1998). Long term Arctic peatland dynamics, vegetation and climate history of the Pur-Taz region, western Siberia. *Boreas*, 27(2), 115-126. DOI: 10.1111/j.1502-3885.1998.tb00872.x.
- Pokrovsky, O.S., Manasyrov, R.M., Loiko, S.V., Shirokova, L.S. (2016). Organic and organo-mineral colloids in discontinuous permafrost zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 188, 1-20. DOI: 10.1016/j.gca.2016.05.035.
- Ponomareva, O.E., Gravis, A.G., Berdnikov, N.M. (2012). Contemporary dynamics of frost mounds and flat peatlands in north taiga of West Siberia (on the example of Nadyem site). *Kriosfera Zemli*, XVI(4), 21-30 (in Russian).
- Reimann, C., & de Caritat, P. (2005). Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, 337(1), 91-107. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.011
- Shotyk, W., Krachler, M., Martinez-Cortizas, A., Cheburkin, A. K., & Emons, H. (2002). A peat bog record of natural, pre-anthropogenic enrichments of trace elements in atmospheric aerosols since 12 370 14 C yr BP, and their variation with Holocene climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1), 21-37. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)00553-8.
- Stepanova, V.A., Pokrovsky, O.S., Viers, J., Mironycheva-Tokareva, N.P., Kosykh, N.P., Vishnyakova, E.K. (2015). Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage. *Applied Geochemistry*, 53, 53-70. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.12.004.
- Velichko, A.A., Timireva, S.N., Kremenetski, K.V., MacDonald, G.M., Smith, L.C. (2011). West Siberian Plain as a late glacial desert. *Quaternary International*, 237(1-2), 45-53. DOI: 10.1016/j.quaint.2011.01.013

Citation:

Lim, A.G., Loyko, S.V., Raudina, T.V., Volkova, I.I., Seredina, V.P. (2018). Element composition of peat deposits in flat frost mound bogs of the Pyakupur River (northern taiga of West Siberia). *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 79-87.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0. License