УДК 631.4

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАСТВОРОВ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ ВДОЛЬ ШИРОТНОГО ГРАДИЕНТА КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Лойко С.В.[1], Раудина Т.В.[1], Кулижский С.П.[1], Покровский О.С.[1]

[1]Лаборатория «БиоГеоКлим», Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, e-mail: s.loyko@yandex.ru

Почвенные растворы – надёжный индикатор климатически обусловленных изменений биогеохимических процессов. Общеизвестно, что наиболее уязвимыми к потеплению климата являются болотные ландшафты криолитозоны, однако данных по почвенным растворам этих ландшафтов очень мало. В то же время наличие данных о широтных трендах гидрохимических параметров вод мерзлых болот может позволить прогнозировать изменение объёмов выноса углерода растворенных органических веществ (УРОВ), макро- и микроэлементов из мерзлых болот в поверхностные воды при потеплении климата. Для восполнения данного пробела было проведено исследование, в ходе которого изучены широтные тренды гидрохимических параметров почвенных растворов мерзлых болот на 640-км профиле в криолитозоне Западной Сибири (тундра, лесотундра, северная тайга). Для этого на пяти ключевых участках отбирали образцы почвенных растворов из торфяных олиготрофных почв на глубинах 30±15 см. В пробах воды определены концентрации УРОВ, макро- и микроэлементов. Установлено, что максимальной концентрации УРОВ достиг на широте 66° с.ш. – на границе прерывистой и непрерывной мерзлотных зон, содержание УРОВ в зоне сплошного распространения мерзлоты было равно или выше, чем в зоне спорадической. Концентрации ряда рассмотренных элементов (Ca, Mg, Al, Mn, Ti, Sr, Ga и др.) показали надёжный тренд увеличения к северу. Для концентраций некоторых элементов отсутствовала какая-либо тенденция или, наоборот, наблюдалось уменьшение к северу. Концентрации УРОВ, Al, Fe, Si, Mn, Cu, Cd, Pb и др. элементов продемонстрировали статистически значимые различия в растворах почв различных микроландшафтов (бугры/полигоны против мочажин). Таким образом, несмотря на ожидаемое снижение интенсивности мобилизации некоторых элементов из почвы и растительного опада в почвенные растворы по мере увеличения роли многолетней мерзлоты и снижения среднегодовой температуры при движении на север, РОУ и некоторые элементы не показали достоверного уменьшения концентраций в этом направлении. Можно полагать, что влияние температуры и мощности активного слоя имеет вторичное значение относительно времени пребывания воды в торфе.

Ключевые слова: почвенные растворы, торфяные мерзлотные почвы, криолитозона Западной Сибири.

HYDROCHEMICAL PARAMETERS OF PEAT SOIL SOLUTIONS ACROSS THE LATITUDINAL GRADIENT OF THE WESTERN SIBERIAN PERMAFROST ZONE

Loyko S.V.[1], Raudina T.V.[1], Kulizhsky S.P.[1], Pokrovsky O.S.[1]

[1] BIO-GEO-CLIM Laboratory, National Research Tomsk State University, Tomsk, e-mail: s.loyko@yandex.ru

Soil solutions are a reliable indicator of climatically conditioned changes of biogeochemical processes. It is well known that the bog landscapes of the permafrost zone are the most vulnerable to climate warming, but there is very little data on soil solutions of these landscapes. At the same time, the availability of data on latitudinal trends in the hydrochemical parameters of frozen marsh waters can predict the change in the volume of dissolved organic matter, macro- and microelements run-offs from frozen bogs to surface waters under climate warming. Thus, we collected solutions from 30±15 cm depth of peat oligotrophic soils (using suction cups, 2-µm pore) across a 640-km latitudinal profile (tundra, forest-tundra, northern taiga) at 5 key sites of Western Siberian permafrost zone. In the filtered samples, hydrochemical parameters, DOC, DIC, macro-, microelements were determined. The DOC demonstrated a maximum of concentration at 66°N, on the border of discontinuous /continuous permafrost zone, whereas the DOC concentration in peat soil solutions from continuous permafrost zone was equal or higher than that in sporadic permafrost zone. Moreover, a number of elements (Ca, Mg, Al, Mn, Ti, Sr, Ga et al.) exhibited the increasing northward concentration trend. For some, there was no trend, or vice versa, there was a decrease to the north. DOC, Al, Fe, Si, Mn, Cu, Cd, Pb et at. showed differences in the content between dominant microlandscapes as well. Therefore, despite the expected decrease of some elements mobilization from the soil and vegetation litter to interstitial fluids with the increase of permafrost coverage and decrease of annual temperature and active layer thickness, DOC and many elements did not exhibit any distinct decrease in concentration along the latitudinal transect (62,2°N to 67,4°N). It can be assumed that the influence of temperature, active layer thickness has a secondary value relative to the water residence time in the peat.

Keywords: soil solutions, Western Siberian permafrost zone, frozen peat soils.

Бореальные и субарктические регионы северного полушария относятся к числу наиболее уязвимых к продолжающемуся потеплению климата, при этом Западно-Сибирская субарктика теплеет значительно быстрее, чем другие регионы мира [1; 2]. Также вследствие широкого распространения торфяных почв, являющихся важным хранилищем углерода, оценки влияния потепления на болота в этом регионе особенно актуальны при изучения углеродного баланса на планете [3; 4]. Наиболее быстро происходящие изменения отзываются на химических параметрах почвенных растворов – наиболее подвижной среде ландшафтов. Отвечая за перераспределение химических элементов по генетическому профилю, почвенная влага влияет также на вынос веществ в сопредельные среды, тем самым являясь связующим звеном между потоками веществ в реках и процессами, происходящими в междуречных ландшафтах [5-8]. Поэтому изучение гидрохимии почвенных растворов является важной составляющей биогеохимического мониторинга окружающей среды, а также необходимо для прогнозирования изменений гидрохимического стока с водосборов в реки и океан. В Западной Сибири торфяные почвы являются важным стокоформирующим компонентом ландшафта, несмотря на это, данные по гидрохимии почвенных растворов для них отсутствуют, что делает невозможным создание достоверных прогнозов изменения гидрохимических потоков из болотных ландшафтов в водные системы. В связи с этим в качестве объекта исследований были выбраны растворы торфяных почв болот, при изучении которых стояла задача определения гидрохимических параметров (углерода растворенных органических веществ (УРОВ), макро- и микроэлементов) с целью выявления их трендов вдоль широтного градиента криолитозоны Западной Сибири.

Материал и методы исследования

Район исследования расположен на севере криолитозоны Западно-Сибирской равнины в пределах тундры, лесотундры и северной тайги, что соответствует зонам сплошного, прерывистого и спорадического распространения многолетнемерзлых пород. Протяженность профиля 640 км, что обусловило широкий охват различных природных условий. Южные точки исследований захватывают талые олиготрофные болота подзоны северной тайги, а самые северные располагаются на мерзлых полигональных болотах южной тундры (рис. 1). Отбор проб почвенных растворов проводился на пяти ключевых участках (КУ), краткая характеристика которых представлена в таблице.

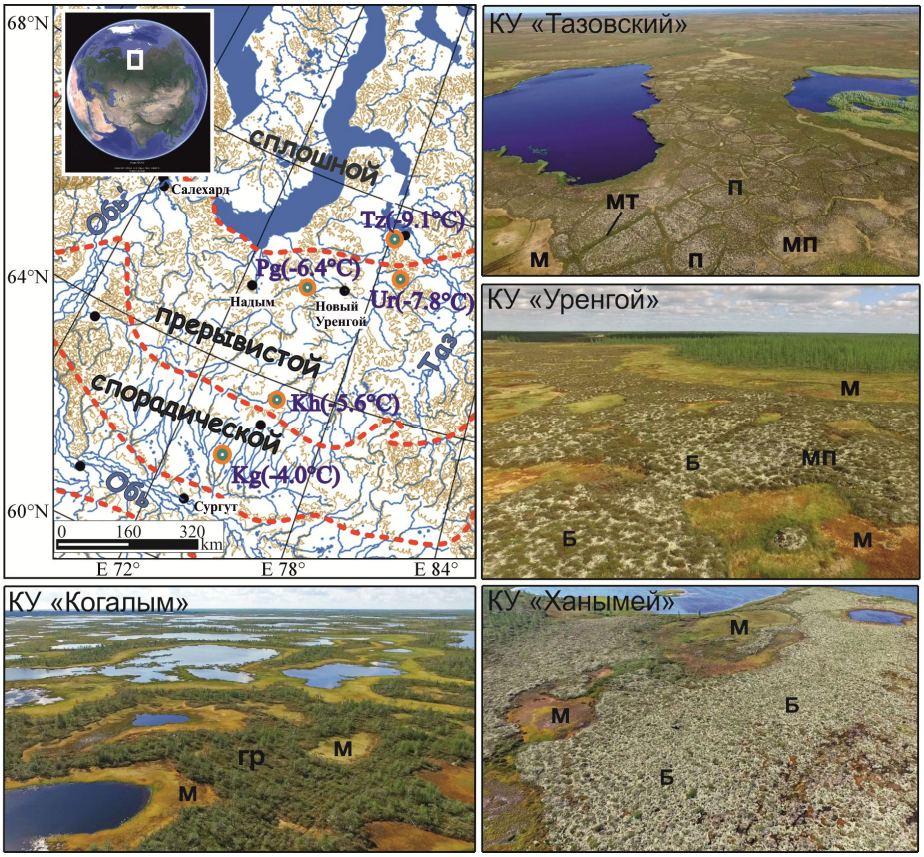

Рис. 1. Район исследований с зонами многолетней мерзлоты [9] и среднегодовыми температурами [10]. Общий вид ключевых участков с формами болотного микрорельефа: Б – бугры; П – полигоны; М – мочажины; МТ – трещины; МП– просадки

Характеристика ключевых участков и микроландшафтов в их пределах

Ключевой участок, широта	Ср.-год. темп., осадки [10]	Микро-ландшафт	Мощн. торфа, м	Глубина СТС, см	Почва [название по 11]
Тазовский (67,4° с.ш.), полигональные болота южной тундры	–9,1 °C 363 мм	полигон	2,0–4,0	41	Dystric Hemic Epicryic Histosols (Hyperorganic); Dystric Murshic Hemic Epicryic Histosols (Hyperorganic)
		просадка/ трещина		55/44	Dystric Epifibric Hemic Cryic Histosols (Hyperorganic); Dystric Epifibric Cryic Histosols (Hyperorganic)
		мочажина	0,2–1,5	65	Dystric Fibric Cryic Histosols; Histic Reductaquic Cryosols (Clayic)
Уренгой (66,1° с.ш.), мерзлые бугристые болота лесотундры	–7,8 °C 453 мм	бугор	2,0–2,5	49	Dystric Hemic Epicryic Histosols (Hyperorganic)
		мочажина	0,3–1,2	98	Histic Reductaquic Cryosols (Loamic); Dystric Fibric Histosols (Gelic)

Пангоды (65,9° с.ш.), мерзлые плоскобугристые болота севера северной тайги	–6,4 °С 484 мм	бугор	0,2–1,3	49	Dystric Hemic Epicryic Histosols; Histic Cryosols (Loamic); Histic Oxyaquic Turbic Cryosols (Loamic)
		просадка	0,6–1,1	74	Dystric Hemic Endocryic Histosols
		мочажина	0,3–1,0	82	Dystric Epifibric Endocryic Histosols; Histic Reductaquic Turbic Cryosols (Loamic); Dystric Fibric Histosols (Gelic)
Ханымей (63,8° с.ш.), мерзлые плоскобугристые болота, центральная часть северотаежной подзоны	–5,6 °С 540 мм	бугор	0,1–1,4	90	Dystric Hemic Cryic Histosols; Spodic Histic Turbic Cryosols (Albic, Arenic); Histic Turbic Cryosols (Albic, Arenic)
		просадка	0,7–1,1	165	Dystric Hemic Histosols (Gelic)
		мочажины	0,4–1,1	215	Dystric Epifibric Histosols; Spodic Histic Turbic Cryosols (Arenic); Gleyic Histic Entic Podzols (Turbic)
Когалым (63,8° с.ш.), талые олиготрофные болота южной части северотаежной подзоны	–4,0 °С 594 мм	гряда	1,7–2,3	отс.*	Dystric Ombric Fibric Histosols (Hyperorganic)
		мочажина	1,0–1,5	отс.	Dystric Ombric Fibric Histosols
* – многолетняя мерзлота на болоте отсутствует					

Почвенные растворы отбирали из деятельного слоя торфяных (мерзлотных) почв (мощность торфа более 50 см) на глубинах 30±15 см от поверхности почвы методом вакуумной фильтрации (45/50–75 кПа) с использованием керамических свечей (поры 2 мкм). Отобранные образцы непосредственно в полевых условиях пропускались через шприц-насадки с одноразовыми фильтрами MILLEX (0,45-мкм) в 10-мл полипропиленовые приемники. В общей сложности в 45 точках отобрано и проанализировано около 80 образцов почвенных растворов. Подробные методики отбора, хранения и описание использованных методов анализа химических параметров и элементного состава почвенных растворов представлены в работе [12]. Для математической и графической обработки данных использовались возможности пакета программ MS Excel 2010 и STATISTICA 8.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что природные воды представляют собой единое целое, но их качественный и количественный состав определяется региональными особенностями. Известно, что состав почвенных растворов довольно специфичен и отличается от других поверхностных и

подземных вод. Атмосферный характер питания изучаемых мерзлых болот Западной Сибири определяет малую общую минерализацию их почвенных растворов (не превышает 50 мг/л) вследствие вымывания и так небольшого количества легкорастворимых солей (Cl^- = 0,04–1,53 мг/л; SO_4^{2-} = 0,08–1,67 мг/л) за пределы почвенного профиля. Наблюдается выраженный дефицит растворенного кислорода (от 7–65% насыщения) на фоне повышенного содержания углекислого газа (120–1996 мкмоль/л), высокая цветность, довольно кислая реакция среды (pH от 3,0 до 5,5) и достаточно высокое содержание растворенных органических веществ (УРОВ = 24,6–195,2 мг/л), доминирующих по массе над минеральными элементами и соединениями.

Помимо описанных общих характерных особенностей, имеются и различия в составе, проявляющиеся как в пределах одного болотного массива по микроландшафтам, так и вдоль широтного мерзлотного градиента рассматриваемой территории. Для установления различий в концентрациях элементов в почвенных растворах между микроландшафтами и КУ был использован статистический U-критерий Манна-Уитни. Согласно проведенному анализу некоторые элементы (УРОВ, Al, Fe, Si, Mn, Cu, Cd, Pb, U и часть редкоземельных элементов (РЗЭ)) показали различия в концентрациях между выпуклыми и вогнутыми микроландшафтами на отдельных ключевых участках. Из всех изученных параметров наибольшие различия между микроландшафтами продемонстрировал УРОВ. Его концентрация в 1,5–2 раза выше в растворах почв выпуклых микроландшафтов (гряды/бугры/полигоны) по сравнению с мочажинами (p = 0,023–0,043). На КУ «Ханымей», «Уренгой» и «Тазовский» значения УРОВ можно расположить в следующий ряд: бугор/полигон ≥ мерзлотная просадка/трещина > мочажина. Минимальный контраст гидрохимических параметров между микроландшафтами наблюдался в почвенных растворах КУ «Пангоды», а максимальный – для КУ «Ханымей». Средние концентрации растворенного неорганического углерода, Cl^-, K, Si, Ca, Mg, Al, Fe, Ti, Sr, Ba, Zn, Mn, Ni всех ключевых участков Западно-Сибирской равнины весьма схожи (±20%) между положительными и отрицательными формами. Концентрации УРОВ, B, Na, V, Ga, Cu, Cs, Pb, Th и редкоземельных элементов имеют в 1,5>0,2 раза (при $p<0,05$) большие значения на буграх/полигонах, чем в мочажинах.

Статистический U-критерий Манна-Уитни был применен для установления различий в элементном составе между КУ (попарное сравнение КУ). УРОВ, Ca, K, Al, Si, Fe имели достоверные различия концентраций между разными КУ. Наиболее сильно КУ различаются по концентрациям элементов в растворах мочажин. Так, почвенные растворы из мочажин самого южного участка (Когалым) статистически отличны по УРОВ, Ca, K, Al, Si, Ni, Cu, Sr,

Rb от мочажин участков Ханымей, Пангоды, Уренгой и Тазовский. УРОВ, Ca, Fe и Sr оказались наиболее чувствительны к широте вне зависимости от типа микроландшафта.

Широтные тренды средних концентраций элементов аппроксимировали линейной регрессией как без разделения на микроландшафты, так и индивидуально для мочажин и бугров/полигонов. В пределах 640-км широтного профиля для большинства элементов, включая УРОВ, не было систематической тенденции увеличения или уменьшения средних концентраций. Наиболее выраженный тренд роста концентраций элементов в северном направлении наблюдался на буграх/полигонах для Al (R^2=0,91), Sr (R^2=0,69), Zr (R^2=0,57), Ce (R^2=0,76), Hf (R^2=0,68) и Th (R^2=0,92), а в мочажинах/просадках менее очевиден или даже отсутствует (при R^2<0,5). Тенденция к уменьшению концентраций элементов к северу также лучше выражена на буграх/полигонах для Na, Cl^-, Rb, Cs и Pb. В целом можно выделить три группы зависимостей гидрохимического параметра от широтного положения участка:

1. Электропроводность, pH, РНУ, РОУ, K, Na, SO_4^{2-}, Si, Fe, Ti, Cr, Ba, Mo, As, легкие РЗЭ (La, Ce), W и U не показали статистически значимой тенденции в широтных изменениях величины параметра (R^2<0,5), или она была статистически неопределенной (рис. 2).

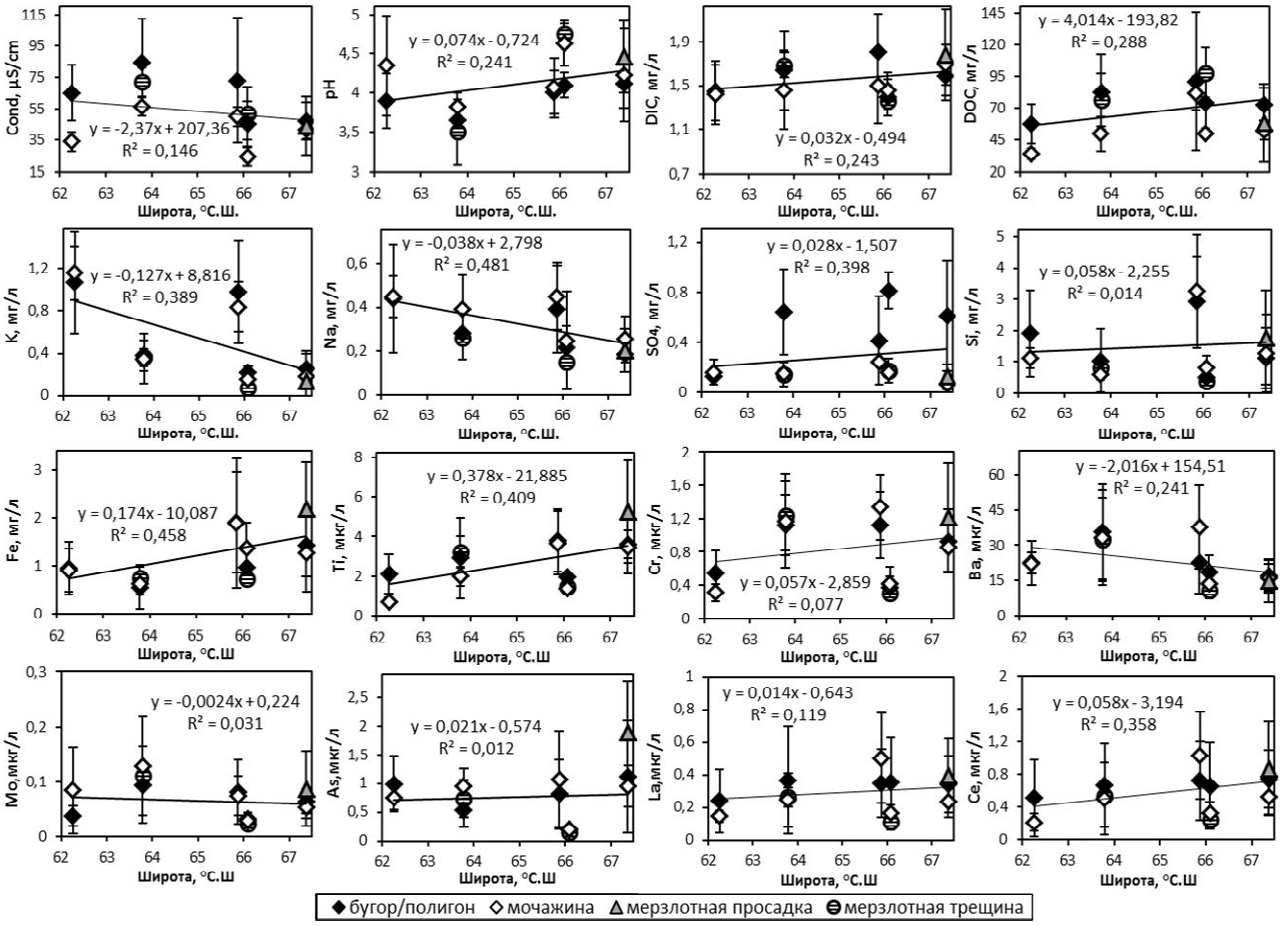

Рис. 2. Средние значения (M±SD) концентраций элементов и химических параметров, не показывающих надежный широтный тренд (R^2<0,5)

2. Cl^-, Sb, Pb, Cd, Zn, Rb, и Cs продемонстрировали тренд уменьшения концентраций к северу ($0,48<R^2<0,84$) (рис. 3).

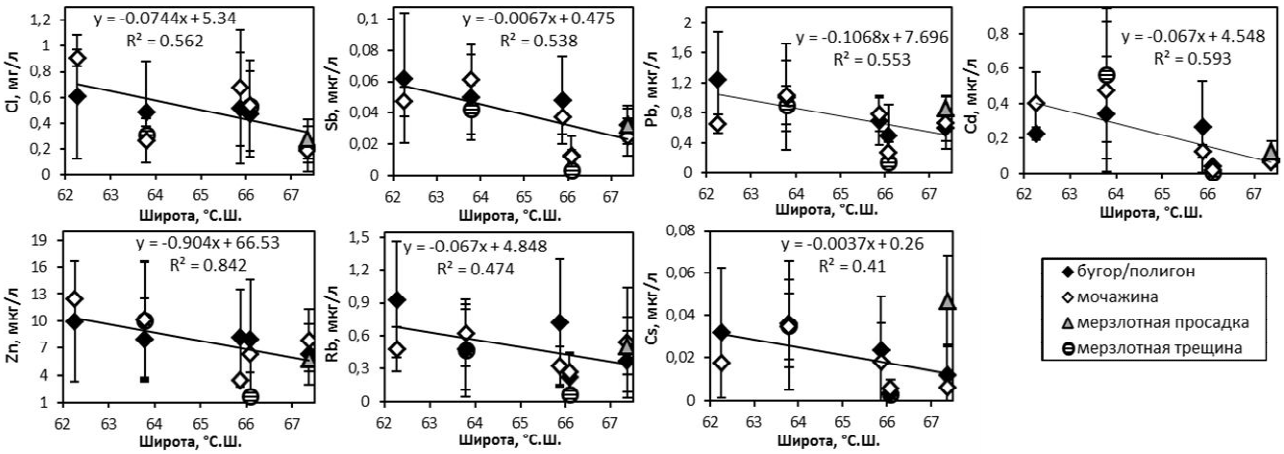

Рис. 3. Средние значения (M±SD) концентраций элементов, демонстрирующих тренд уменьшение к северу ($0,48< R^2<0,84$)

3. Значимый тренд возрастания концентраций к северу ($0,45<R^2<0,62$, $p<0,05$) зафиксирован для $SUVA_{280}$ (коэффициент ароматичности растворенных органических веществ; чем он выше, тем больше веществ с ароматическими структурами), Mg, Ca, Al, Cu, V, Mn, Ni, Sr, тяжелые РЗЭ, Zr, Hf, Th. Отмечается возрастание их значений в 2–5 раз от зоны спорадического к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (рис. 4). Рост к северу показателя $SUVA_{280}$ свидетельствует об увеличение ароматичности органического вещества. На юге выше вклад низкомолекулярных соединений и проницаемых для ультрафиолетового излучения микробных экзаметаболитов.

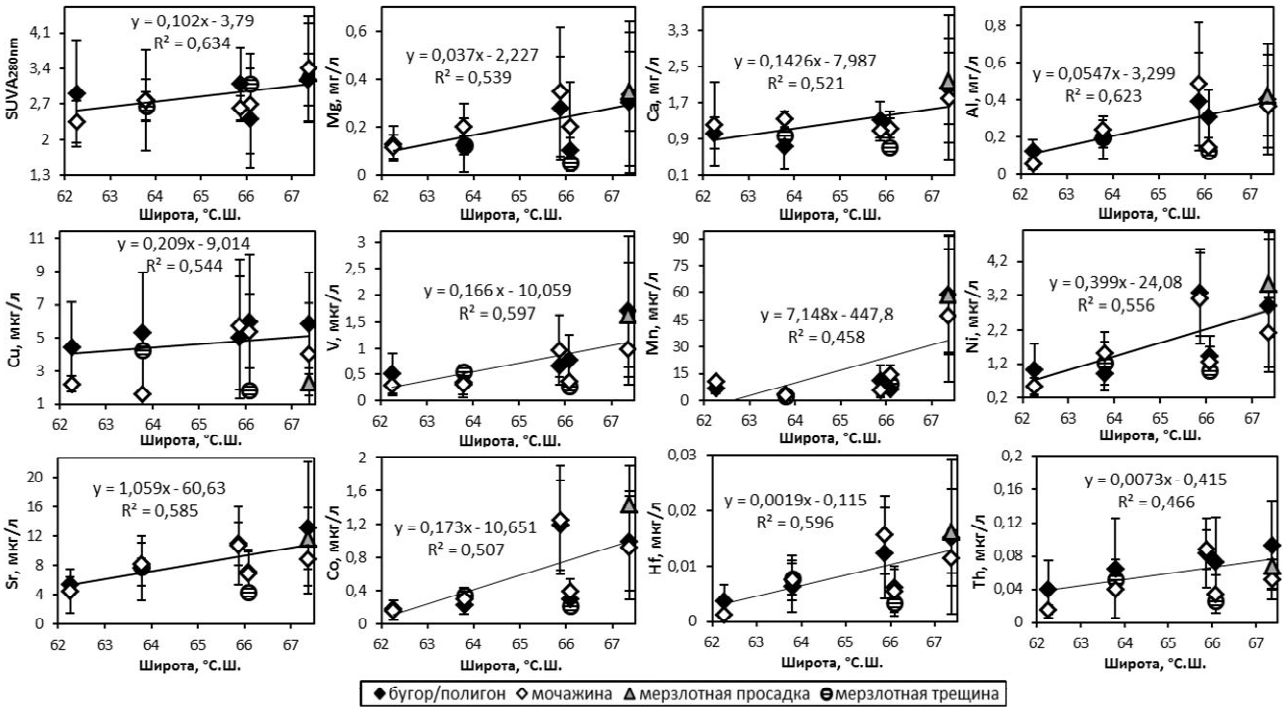

Рис. 4. Средние значения (M±SD) концентраций элементов, показывающих четкий тренд устойчивого возрастания концентраций к северу ($0,45<R^2<0,62$, $p<0,05$)

Первоначально ожидалось, что при движении на север, по мере увеличения роли многолетней мерзлоты и уменьшении средней температуры, будет наблюдаться снижение интенсивности мобилизации УРОВ и металлов из почв и растительных подстилок в почвенные растворы, связанное с уменьшение времени существования и мощности сезонно-талого слоя. Однако концентрации УРОВ и многих макро- и микроэлементов не продемонстрировали достоверного уменьшения концентраций к северу (от 62,2° до 67,4° с.ш.). Более того, концентрации многих макро- (Ca, Mg, Fe) и микроэлементов (Al, Mn, Ti, Ni, Sr, Ga, Co, РЗЭ, Zr, Hf, Th) показали надёжный тренд увеличения их концентраций на север. Этот результат противоречит первоначальной гипотезе и доминирующей парадигме, согласно которой будет наблюдаться увеличение мобилизации УРОВ из почв в реки с повышением температуры почвы при потеплении климата.

При интерпретации полученных пространственных данных можно использовать методологический принцип «перевода пространственного ряда данных во временной». Использование этого принципа возможно, если вдоль широтного профиля условно стабильны все факторы, кроме рассматриваемого, в данном случае – климата. Это позволяет прогнозировать изменение параметров почвенных растворов при изменении климата, опираясь на полученные ряды данных. Ранее подобный подход был использован нами для интерпретации данных по гидрохимическим параметрам рек Западной Сибири [13]. Если полученные широтные тренды концентраций интерпретировать как временные, по принципу, что при потеплении климата более северные болота станут походить по своим параметрам на расположенные южнее, можно сделать следующий прогноз по изменению концентраций элементов в почвенных растворах.

На 1-м этапе (первые десятки лет – сотня лет) произойдёт увеличение мощности деятельного слоя почв мерзлых болот. Почвенные растворы северной части ареала бугристых болот будут подобны таковым в южной части ареала. Плоские бугры в южной части ареала бугристых болот могут практически полностью лишиться многолетней мерзлоты в пределах торфяной залежи. Соответственно этому произойдёт уменьшение в 1,3±0,2 раза значений показателя $SUVA_{280}$ и концентраций УРОВ, Ca, Mg, Sr, Al, Fe, Ti, Mn, Ni, Co, V, Zr, а также редкоземельных элементов. На 30±10% увеличатся концентрации Cl^-, Na, K, Rb, Cs, Zn, P и Sb. На втором этапе сформировавшиеся на болотах просадки будут превращаться в мочажины, по мере расширения площади пушицево-сфагновых мочажин. Мерзлые бугристые болота, особенно в южной части их современного ареала, станут

подобны талым олиготрофным болотам без мерзлоты. 2-й этап будет более длительным, займёт 500–1000 лет (время, необходимое для нарастания верхового торфа с ведущим участием топяных видов сфагнумов на 20–30 см). Будет сформирован новый микрорельеф, уже не связанный с неоднородностью мерзлотных условий. На втором этапе произойдёт уменьшение концентрации УРОВ, растворенного неорганического углерода, макро- и микроэлементов не более чем на 30%. Таким образом, прогнозируемое при потеплении климата увеличение мощности деятельного слоя и биомассы растительности, изменение гидрологических режимов вряд ли изменит химический состав растворов торфяных почв сильнее, чем в 2 раза, то есть сильнее, чем их современная изменчивость по широте, а также в пределах различных болотных микроландшафтов.

Полученные выводы противоречат доминирующей парадигме, выработанной на существенно менее заторфованных территориях криолитозоны Северной Америки, согласно которой продолжающееся потепление климата должно привести к увеличению концентраций УРОВ, гидрокарбонатов, анионов, макро- и микроэлементов в реках с мерзлотными водосборами. Такую разницу в откликах на глобальное потепление можно объяснить разницей в почвенных покровах водосборов малых рек криолитозоны Северной Америки и Западной Сибири. В Америке водосбросы преимущественно сложены минеральными почвами, поэтому при увеличении деятельного (растаявшего) слоя пополнение вымытых минеральных элементов происходит за счёт выветривания (разрушения) минералов. В Западной Сибири водосбросы торфяные, поэтому выветриваемого материала не так много, за исключением атмосферной силикатной пыли, поступающей в ничтожных количествах. Следовательно, увеличение времени оттаивания почв ведёт к прогрессирующему обеднению вод элементами.

Заключение

Полученные результаты показали, что состав почвенных растворов различен и варьирует как по микроландшафтам болотного массива, так и вдоль изученного широтного профиля. Причем при движении на север, по мере увеличения роли многолетней мерзлоты и уменьшения средней температуры, не наблюдается снижение интенсивности мобилизации УРОВ и других элементов из почв, и растительных подстилок в почвенные растворы. Концентрации УРОВ, многих макро- и микроэлементов не демонстрируют достоверного уменьшения к северу (от 62,2° до 67,4° с.ш.). Так, максимальное содержание УРОВ зафиксировано на широте 66° с.ш., на границе прерывистой и непрерывной мерзлотных зон. Большинство элементов (Ca, Mg, Fe, Al, Mn, Ti, Ni, Sr, Ga, Co, РЗЭ, Zr, Hf, Th) показали также надёжный тренд увеличения концентраций к северу, а некоторые (Ca, Mn, Co, V и As) отсутствие какой-либо тенденции между 62° и 66,5° с.ш. с последующим увеличением

($p<0,05$) между 66° и 67,5° с.ш. Помимо этого, большинство элементов (УРОВ, Al, Fe, Si, Mn, Cu, Cd, Pb, U) в почвенных растворах показали более высокие концентрации на буграх/полигонах по сравнению с мочажинами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-34-60203 мол_а_дк.

Список литературы

1. Jones P.D. Moberg A. Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update // Journal of Climate. – 2003. – Vol. 16. – № 2. – P. 206–223.
2. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. – 2015. – Vol. 520. – P. 171–179.
3. Gentsch N., Mikutta R., Alves R.J.E. et al. Storage and transformation of organic matter fractions in cryoturbated permafrost soils across the Siberian Arctic // Biogeosciences. – 2015. – Vol. 12. – P. 4525–4542.
4. Kremenetski K.V., Velichko A.A., Borisova O.K. et al. Peatlands of the West Siberian Lowlands: Current knowledge on zonation, carbon content, and Late Quaternary history // Quaternary Sci. Rev. – 2003. – Vol. 2. – № 5–7. – P. 703–723.
5. Караванова Е.И., Малинина М.С. Пространственная и временная вариабельность элементного состава почвенных растворов торфянисто-подзолистых глееватых почв // Почвоведение. – 2007. – № 8. – С. 927–936.
6. Camino-Serrano M., Gielen B., Luyssaert S. et al. Linking variability in soil solution dissolved organic carbon to climate, soil type, and vegetation type // Global Biogeochemical Cycles. – 2014. – Vol. 28. – № 5. – P. 497–509.
7. Camino-Serrano M., Pannatier E.G., Vicca S. et al. Trends in soil solution dissolved organic carbon (DOC) concentrations across European forests // Biogeosciences. – 2016. – Vol. 13. – P. 5567–5585.
8. Essington M.E. Soil and water Chemistry: An integrative approach. – Boca Raton, London, NY, Washington: CRC press, 2004. – 534 p.
9. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions / J. Brown, O.J. Ferrians, Jr. J.A. Heginbottom, E.S. Melnikov. – Washington, DC: U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10,000,000, eds. 1997. – 1 p.

10. Научно-прикладной справочник по климату СССР, Тюменская и Омская области. Серия 3. Выпуск 17 / ред. З.Н. Пильникова. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. – 702 с.
11. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106, Rome: FAO, 2015. – 192 p.
12. Раудина Т.В., Лойко С.В., Крицков И.В., Лим А.Г. Сравнение состава почвенных вод мерзлых болот Западной Сибири, полученных различными методами // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. – 2016. – В. 35. – № 3. – С. 26–42.
13. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S. et al. Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers // Biogeosciences. – 2015. - Vol. 12. – P. 6301–6320.