

УДК 550.47

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ МАКРОФИТОВ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Манасыпов Ринат Мратович^{1,2},
rmmanassypov@gmail.com

Покровский Олег Сергеевич^{1,2,3},
oleg.pokrovski@get.omp.eu

Широкова Людмила Сергеевна^{2,3},
liudmila.shirokova@get.omp.eu

Кирпотин Сергей Николаевич¹,
kirp@mail.tsu.ru

Зиннер Надежда Сергеевна¹,
zinner@inbox.ru

¹ Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

² Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаврова РАН,
Россия, 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 23.

³ Национальный центр научных исследований,
Франция, 31400, г. Тулуза, ул. Эдуарда Билана, 14.

Актуальность. Растения-макрофиты являются одним из ключевых звеньев накопления химических элементов в озерных экосистемах, несмотря на это в настоящее время остается практически не изученным вопрос элементного состава макрофитов термокарстовых озер Западной Сибири и аккумуляции ими химических элементов относительно донных отложений и поровой воды.

Цель: описание формирования элементного состава видов макрофитов термокарстовых озер севера Западной Сибири и выявление возможности их использования в биомониторинге.

Объектами исследования служили растения-макрофиты (*Hippuris vulgaris* L., *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., *Comarum palustre* L., *Ranunculus spitzbergensis* Hadac, *Carex aquatilis* Wahlenb s. str., *Menyanthes trifoliata* L.), донные отложения, поровые воды донных отложений термокарстовых озер севера Западной Сибири.

Методы. Исследование элементного состава образцов проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, Agilent Technologies, 7500 ce), концентрации анионов в образцах воды определялись методом жидкостной хроматографии (Dionex ICS-2000), определение растворенного органического углерода проводилось методом инфракрасной спектроскопии (TOC-VCSN, Shimadzu), содержание органического углерода донных отложений определялось методом инфракрасной спектрометрии (Horiba Jobin Yvon Ema-320V C/S Analyzer). Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета программ STATISTICA 6.0.

Результаты. Коэффициенты биологического накопления химических элементов в макрофитах относительно донных отложений и поровой воды были рассчитаны для четырех ключевых термокарстовых озер. Было показано, что водными растениями термокарстовых озер Западной Сибири активно накапливаются макроэлементы (Na, Mg, Ca), некоторые тяжелые металлы и металлоиды (Ni, Cu, Zn, Co, As, Cd), а также В и Мо. Высокие коэффициенты накопления тяжелых металлов могут говорить о существенной фиторемедиационной функции растений-макрофитов данной территории.

Ключевые слова:

Термокарстовые озера, Западная Сибирь, макрофиты, донные отложения, поровая вода, макро- и микроэлементы, коэффициент биологического накопления.

Введение

Растения-макрофиты являются неотъемлемым звеном накопления химических элементов в водных экосистемах и имеют первостепенное значение для мониторинга металлов в водных экосистемах [1]. Использование водных растений (in situ) в оценке качества воды в течение многих лет является принятым для биомониторинга природной среды [2–4]. Неподвижная природа макрофитов делает их особенно эффективным биоиндикатором загрязнения водных экосистем, т. к. они представляют реальные уровни загрязнения, присутствующие на территории произрастания. Концен-

трация металлов в макрофитах обычно пропорциональна их содержанию в осадках [5]. Известно, что корни водных растений поглощают микроэлементы из поровой воды и могут накапливать их в высоких концентрациях [6–8]. Ранее было описано, что если коэффициент биологического накопления >1 , то растение является активным накопителем химического элемента [9, 10].

Исследование макрофитов термокарстовых озер до настоящего времени практически не проводилось. Имеются обрывочные данные об изучении макрофитов термокарстовых озер и озер арктических регионов. Так, ранее было показано [11], что

для термокарстовых озер дельты р. Маккензи автохтонные источники растворенного органического углерода (РОУ) составляют всего 15 %, органическое вещество макрофитов быстро ассимилируется бактериями, внося существенный вклад в микробные пищевые сети. В арктических регионах Канады проведены работы по изучению биомассы макрофитов – высших растений [12–14], и водных мхов [15], произрастающих в термокарстовых озерах.

Целью данной работы явилось описание биогеохимических условий формирования элементного состава видов макрофитов (*Hippuris vulgaris* L., *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., *Comarum palustre* L., *Ranunculus spitzbergensis* Hadac, *Carex aquatilis* Wahlenb s. str., *Menyanthes trifoliata* L.) термокарстовых озер севера Западной Сибири и выявление их потенциального использования в биомониторинге. Для этого были выполнены следующие работы: 1) определение химического состава донных отложений, поровой воды и травы макрофитов термокарстовых озер, 2) расчет коэффициентов биологического накопления химических элементов макрофитами.

Объекты и методы исследования

Район исследований находится в пределах тундры и лесотундры северной части Западной Сибири, в пределах сплошной и прерывистой зон распространения многолетнемерзлых пород (рис. 1). Данный район характеризуется повсеместным распространением преимущественно малых озер с площадью водного зеркала менее 1 км², их суммарная площадь для озер лесотундры и лесоболотной зоны составляет 44000 км² [16, 17]. Изученные нами водные объекты представляют собой тер-

мокарстовые озера с берегами, сложенными торфяной толщей, донные отложения озер представлены торфяным детритом, а также деградировавшей при затоплении торфяной почвой [18]. Наиболее крупные термокарстовые озера, возникающие в торфяниках, имеют размеры до 1 км и более [19] при глубине 0,5–1,5 м.

Из-за активной добычи углеводородов поверхностные и подземные воды данного региона могут быть загрязнены вследствие разработки нефтяных месторождений. Тем не менее, все изученные нами озера находятся вне поля добычи нефти.

Методики полевых и лабораторных исследований

Отбор образцов озерной и поровой воды, донных отложений и макрофитов

Образцы воды были собраны с поверхности (от 0,3 до 0,5 м) озер в предварительно вымытые в чистой комнате полипропиленовые флаконы (250 мл). Затем пробу фильтровали на месте (или в течение 4 часов) после отбора через одноразовый фильтр MILLEX Filter units (0,45 мкм) с использованием стерильного пластикового шприца и виниловых перчаток. Первые 20–50 мл фильтрата не использовали для анализа.

Водные растения отбирались с использованием виниловых перчаток, после отбора макрофиты тщательно промывались озерной водой и помещались в осмотические пакеты фирмы Osmofilm для высушивания до воздушно-сухого состояния и избегания различного рода загрязнений.

Донные отложения были отобраны с глубины 45–50 см, затем делились на две половины и герметично упаковывались. Глубины колонок донных отложений совпадают с мощностями корне-

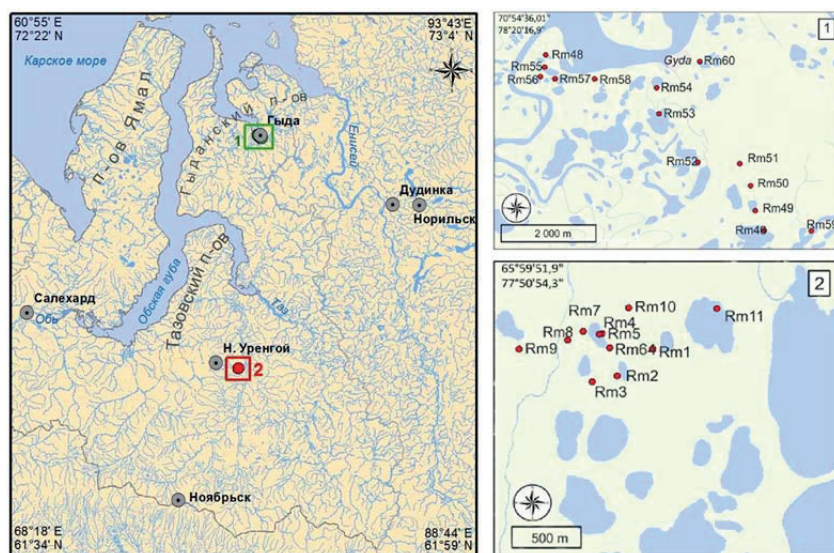


Рис. 1. Карта-схема района исследований: 1 – район окр. п. Гыда (Гыданский п-ов), тундровая зона, зона сплошного распространения многолетнемерзлых пород; 2 – районы окр. п. Пангоды, лесотундровая зона, зона прерывистого распространения многолетнемерзлых пород

Fig. 1. Map-scheme of the area of research: 1 – Gyda area (Gydansky Peninsula), tundra zone, zone of continuous permafrost; 2 – Pangody areas, forest-tundra zone, zone of discontinuous permafrost

вых систем отобранных нами видов макрофитов. Первые 20–30 см донных отложений являются наиболее репрезентативными, т. к. в них сосредоточена основная корневая система растений-макрофитов [20], а также верхние слои отложений представляют собой потенциально сконцентрированный запас химических элементов, которые могут быть мобилизованы макрофитами [21].

Вторую половину колонки донных отложений использовали для отжима поровых вод.

Образцы донных отложений высушивались до воздушно-сухого состояния в чистом помещении при комнатной температуре и хранились до анализа в чистых полиэтиленовых пакетах.

Сразу же после отжима поровых вод в них измеряли pH на иономере «Анион 4151». Поровые воды до химического анализа хранили в закрытых пробирках в холодильнике.

Лабораторные исследования полученных образцов

Отфильтрованные образцы озерной и поровой воды делились на две части каждая: одна подкислялась бидистиллированной азотной кислотой до pH=2 для анализа катионов, а другую часть не подкисляли для анализа РОУ и анионов. До анализа образцы хранились в холодильнике.

Концентрации РОУ, Cl⁻, SO₄²⁻ и катионов были измерены с использованием стандартных методов, которые практикуются для бореальных, богатых органикой, слабоминерализованных образцов воды [22, 23]. Концентрации химических элементов были измерены с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на квадрупольном ICP-MS (Agilent Technologies, 7500 ce) с использованием внутреннего стандарта In+Re с точностью ±5 %. Международные геостандарты SLRS-4 и SLRS-5 (Стандарт речной воды для определения микроэлементов, сертифицирован Национальным исследовательским советом Канады) были использованы для проверки каждого анализа. Сходимость результатов с сертифицированным международным стандартом SLRS-4 составляла 10–15 % для 40 элементов, кроме В и Р (≤30 %).

Неподкисленные образцы были использованы для следующих видов анализа: 1) определение содержания РОУ методом полного сжигание при 800 °С на платиновом катализаторе с дальнейшим определением CO₂ методом инфракрасной спектроскопии (TOC-VCSN, Shimadzu). Погрешность 5 %, предел обнаружения 0,1 мг/л; 2) определение хлоридов и сульфатов проводилось методом жидкостной хроматографии высокого разрешения в интервале 0,05–10 мг/л (Dionex ICS-2000). Погрешность 2 %, предел обнаружения 0,02 мг/л.

Подготовку проб донных отложений и макрофитов к анализу проводили методом кислотного разложения смесью азотной, плавиковой и хлорной кислот, в стаканах из фторопласта. Перед разложением высушенные пробы растирались в ага-

товой ступке в чистом помещении. Ступки промывались спиртом и дистиллированной водой после каждого образца. Непосредственно перед анализом образцы сушили в течение 24-х часов в сушильном шкафу при температуре 50 °С.

Элементный состав проб определяли на квадрупольном ICP-MS (Agilent Technologies, 7500 ce) с добавлением внутреннего стандарта In+Re. Предел обнаружения 1 нгр/л–1 мг/л в анализируемом растворе. Погрешность 0,1 нгр/л.

Содержание органического углерода (C_{орг}) в образцах донных отложений определяли методом сжигания в индуктивной печи с одновременным обнаружением CO/CO₂/SO₂ методом инфракрасной спектрометрии на анализаторе серы и углерода (Horiba Jobin Yvon Emla-320V C/S Analyzer). Точность метода определялась сертифицированными стандартными образцами С и S (HOR-007, JSS242–11, HC16024). Точность измерения в пределах 2 % от аттестованных стандартов.

Статистическая обработка данных и построение диаграмм проводились с использованием пакета программ STATISTICA 6.0 и MS Excel 2016.

Описание исследованных водных растений (макрофитов)

В ходе проведения исследований было изучено шесть видов макрофитов.

Hippuris vulgaris L. – пресноводный мезотрофный гидрофит [24]. Произрастает в реках, мелких водоемах, ручьях, на песчаных и илистых отмелях, в зарастающих озерах, старицах, заболоченных поймах рек и на болотах [25].

Glyceria maxima (Hartm.) Holmb. – пресноводный мезотрофный гидрогифит [24], произрастает в Сибири по берегам водоемов [25]. Используется в качестве биомонитора [26, 27].

Comarum palustre L. – пресноводный олиго-мезотрофный гидрогифит [24]. В Сибири произрастает на болотах, болотистых лугах, заболоченных лесах, тундрах, по берегам рек и озер [25]. Является лекарственным растением [28, 29].

Ranunculus spitzbergensis Hadac – произрастает в арктических районах Сибири в болотистой тундре, топких местах, на берегах озер и стариц [25].

Carex aquatilis Wahlenb s. str. – пресноводный олиго-мезотрофный гидрогифит [24]. Произрастает по берегам водоемов, нередко в воде [25]. Активно используется для целей фиторемедиации [30, 31], а также в мониторинге промышленного загрязнения [32].

Menyanthes trifoliata L. – пресноводный олиготрофный гидрогифит [24], встречается на болотах, по сырым берегам [25]. *M. trifoliata* наиболее активно участвует в биогеохимических процессах озерно-болотных экосистем данной территории. При разложении ветоши и корней *M. trifoliata* в течение года теряется до 97 % макроэлементов [33]. Является ценным лекарственным растением [34–36].

Результаты

Химический состав макрофитов севера Западной Сибири

Для сравнения элементного состава изученных нами растений были использованы литературные данные по содержанию химических элементов в макрофитах фоновых озер севера Западной Сибири и в образцах багульника болотного (*Ledum palustre* L.), как доминанта растительного покрова территории плоскобугристых болот и тундр севера Западной Сибири [37, 38]. Также использованы литературные данные по элементному составу изученных видов растений, произрастающих на территориях, расположенных в немерзлотной зоне. Усредненное содержание химических элементов в изученных растениях представлено на рис. 2.

Как показано на рис. 2, наибольшими концентрациями для всех макрофитов представлены макроэлементы (К, Са, Mg) и некоторые тяжелые металлы, наименьшими – редкоземельные элементы, а также трех- и четырехвалентные элементы-гидролизаты, малоподвижные в пресных водах и биологически недоступные растениям.

Максимальное по сравнению с другими видами содержание Na и Fe обнаружено в *H. vulgaris* (21141±3790 мг/кг и 12978±4341 мг/кг, соответственно), описанное нами содержание Fe в пять раз больше, чем указанное для территории Армении (2651 мг/кг, [39]), что объясняется высокими содержаниями железа в почвах и поверхностных водах территории исследований и практически в 10 раз больше, чем описанное ранее для макрофитов севера Западной Сибири (960 мг/кг, [37]), что может быть объяснено образованием вторичных минералов железа на поверхности изученных растений, а также оттаиванием сезонно-талого слоя до минерального горизонта в тундровой зоне. Минимальное содержание данных элементов обнаружено в *Carex aquatilis* (Na: 235,5 и Fe: 399,7 мг/кг), что в два раза выше, чем описано для территории США (Fe: 195 мг/кг, [32]).

Наибольшим содержанием Mg и Са характеризуется *Comarum palustre* (5704 и 6513 мг/кг, соответственно), что в пять раз больше, чем для *G. maxima* (1344±588,6 и 788,9±461,7 мг/кг, соответственно), и в два раза больше, чем описано для *Comarum palustre* территории Красноярского края (Mg: 2410±10 и Са: 3850±20 мг/кг, [28]). Калий, активно участвующий в синтезе углеводов и большинстве ферментативных процессов, наибольшее содержание имеет в *H. vulgaris* (26936±9570 мг/кг), что в четыре раза меньше, чем в *M. trifoliata* (8765±9620 мг/кг, важно отметить, что имеется единичное высокое значение 25731 мг/кг).

Алюминий активно накапливается *G. maxima* до значения 2142 мг/кг, что практически в сто раз больше, чем содержание алюминия в *Carex aquatilis* (22,7 мг/кг). Среди тяжелых металлов наименьшие концентрации во всех изученных видах макрофитов имеет сурьма (0,032±0,021 мг/кг, *G. maxima*) (рис. 3).

Для *R. spitzbergensis* также характерно высокое содержание Na и В (10211±5717 мг/кг и 17,2±5,98 мг/кг, соответственно), что может быть объяснено их произрастанием вблизи Карского моря.

Важно отметить минимальную концентрацию урана в *Carex aquatilis* по сравнению с другими видами макрофитов (0,001 мг/кг).

Также ранее было описано [40], что имеются некоторые особенности накопления химических элементов в *M. trifoliata*, произрастающей в термокарстовых озерах разных стадий развития. В *M. trifoliata*, произрастающей на литорали термокарстового озера, содержатся высокие концентрации таких элементов, как: К, Sb, Pb и Ва. *M. trifoliata*, произрастающая в старом хасырее, наиболее богата такими макроэлементами, как Mg и Са, и микроэлементами Mn, Co, Rb, Sr, Cs.

Особенностью всех изученных нами видов макрофитов является высокое содержание железа (рис. 3), что закономерно объясняется высоким фоновым содержанием данного элемента в почвах и поверхностных водах данного региона [41, 42].

Максимальное по сравнению с другими видами содержание Mn обнаружено в *R. spitzbergensis* и *Comarum palustre* (1339±480 мг/кг и 1224 мг/кг, соответственно). Важно отметить, что данные значения в разы отличаются от макрофитов (160 мг/кг, [37]) и растений доминантов болот и тундр севера (519 мг/кг, [38]) данного региона. Минимальное содержание Mn характерно для *G. maxima* (202±177 мг/кг), что в два раза меньше, чем описано для данного вида растения территории Польши (553 мг/кг, [26]).

Максимальное содержание Со обнаружено в *H. vulgaris* (6,3±1,1 мг/кг), что согласуется с описанными концентрациями для территории Армении (7,6 мг/кг, [39]), по-видимому, данная особенность в накоплении Со данным видом растения объясняется видоспецифичностью и не зависит от территории произрастания.

Ni и Cu показывают максимальное содержание в *Comarum palustre* (11,3 и 9,5 мг/кг, соответственно), что на порядок больше, чем для территории Красноярского края и Западного Забайкалья (Ni: 0,65 мг/кг, [28]; Ni: 0,7 и Cu: 1,5 мг/кг, [36], соответственно), и может объясняться возможным загрязнением районов Крайнего Севера, а также увеличением концентрации данных элементов с юга на север в подстилающем субстрате [41, 43].

Максимальная концентрация Zn обнаружена в *Carex aquatilis* (75,5 мг/кг), что больше, чем для территории Канады (16 мг/кг, [31]), и меньше, чем для территории США (120 мг/кг, [32]). Минимальная концентрация Zn характерна для *G. maxima* (22,1±5,7 мг/кг), что соотносится с ранее описанными концентрациями в макрофитах и доминантных болотных растениях Западной Сибири (21 мг/кг, [37, 38]), но в два раза больше, чем описано для *G. maxima*, произрастающего на территории Польши (10,3 мг/кг, [26]). Вероятно, данные значения обусловлены повышенными фоновыми

концентрациями данного элемента на территории исследований [44].

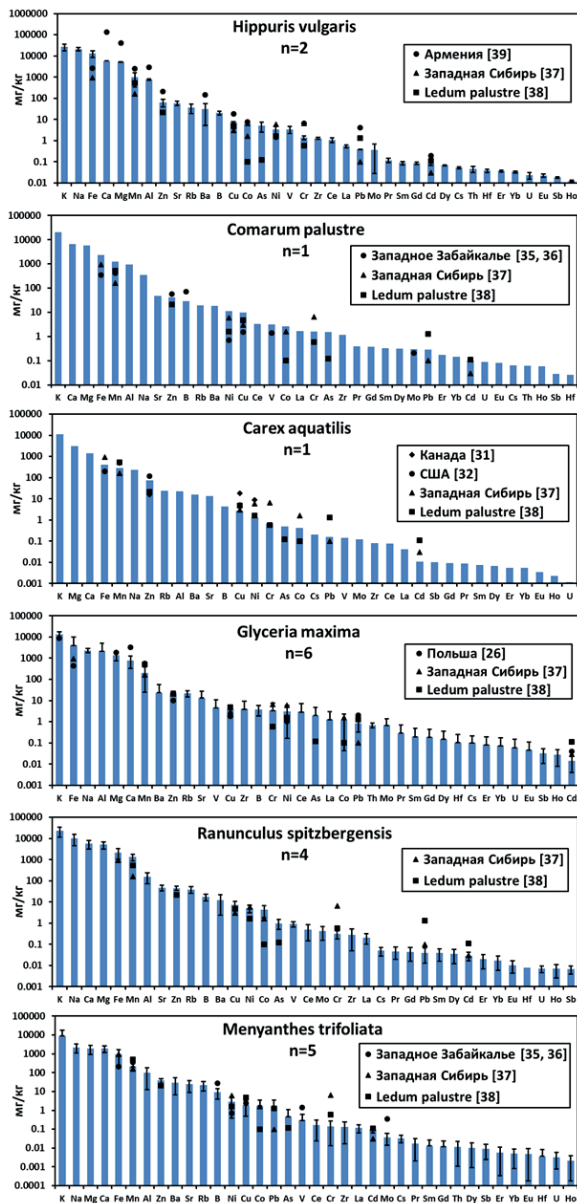


Рис. 2. Концентрации химических элементов в изученных видах макрофитов, n – количество образцов растений, на диаграммах показано стандартное отклонение ($\pm SD$)

Fig. 2. Concentrations of chemical elements in macrophytes, n is the number of plant samples; the diagram shows the standard deviation ($\pm SD$)

Максимальное содержание As обнаружено в *H. vulgaris* ($4,9 \pm 2,4$ мг/кг), единичное максимальное значение – в *G. maxima* (7,7 мг/кг), минимальные концентрации характерны для *M. trifoliata* и *Carex aquatilis* (0,471 и 0,49 мг/кг, соответственно). Данные значения концентрации As значительно выше, чем описано для *Ledum palustre* – основного растения доминанта болот Западной Сибири (0,12 мг/кг, [38]), по-видимому, это объясняет-

ся более высокими индикаторными свойствами макрофитов [2].

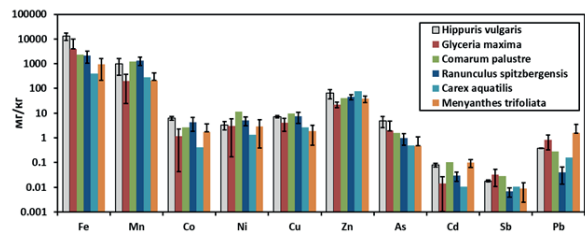


Рис. 3. Концентрации тяжелых металлов и металлоидов в изученных видах макрофитов, на диаграмме показано стандартное отклонение ($\pm SD$)

Fig. 3. Concentrations of heavy metals and metalloids in macrophytes, the diagram shows the standard deviation ($\pm SD$)

Cd максимально содержится в *Comarum palustre* (0,102 мг/кг), имеется единичное высокое содержание Cd в траве *M. trifoliata* (0,148 мг/кг), что соотносится с данными, полученными для немерзлотной зоны Западной Сибири ($0,1 \pm 0,03$ мг/кг, [45]). Минимальное значение характерно для *Carex aquatilis* (0,011 мг/кг). При этом важно отметить, что минимальное обнаруженное нами содержание Cd соотносится с описанным ранее уровнем для макрофитов данной территории (0,03 мг/кг, [37]), а максимальные концентрации сопоставимы со средними значениями растений-доминантов тундр и бугристых болот (0,11 мг/кг, [38]).

Sb активно накапливается в *G. maxima* ($0,032 \pm 0,021$ мг/кг), данный макрофит является индикаторным видом для сурьмы. Минимальные значения концентрации Sb характерны для *R. spitzbergensis* ($0,007 \pm 0,003$ мг/кг).

Максимальная концентрация Pb в *M. trifoliata* ($1,56 \pm 1,98$ мг/кг, максимальное содержание 5,0 мг/кг), что на порядок больше, чем указывалось для немерзлотной зоны Западной Сибири ($0,22 \pm 0,07$ мг/кг, [45]). Единичное высокое содержание Pb отмечается в *G. maxima* (1,618 мг/кг), что соотносится с описанным содержанием для территории Польши (2,04 мг/кг, [26]).

Минимальными концентрациями в растениях всех экосистем характеризуются редкоземельные элементы (РЗЭ), малоподвижные в пресных водах и биологически недоступные растениям, а также трех- и четырехвалентные гидролизаты. Представляется интересным уменьшение общей концентрации редкоземельных элементов в ряду: *Comarum palustre* > *G. maxima* > *H. vulgaris* > *R. spitzbergensis* > *M. trifoliata* > *Carex aquatilis*, что, вероятно, объясняется видоспецифичностью макрофитов.

Высокое содержание Mn и Pb и низкое содержание Cr в изученных нами растениях согласуются с ранее опубликованными материалами других авторов [38, 46]). Также высокое содержание Mn, Fe и Pb отмечено для торфа верховых болот севера Западной Сибири [46] и для кустистых лишайников данной территории [47, 48].

Для расчета коэффициентов биологического накопления, определения элементного состава донных отложений и поровых вод были изучены четыре наиболее характерные озерные экосистемы севера Западной Сибири, три термокарстовых озера тундровой зоны в окрестностях п. Гыда (RM55, RM57, RM58) и одно термокарстовое озеро (RM64) в лесотундровой зоне (окрестности п. Пангоды).

Донные отложения

В донных отложениях термокарстовых озер севера Западной Сибири нами рассмотрено содержание $C_{орг}$, тяжелых металлов и металлоидов (Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Pb), которые являются одними из основных компонентов атмосферных выбросов, а также концентрации Fe и Mn, играющих важную роль в процессах сорбции тяжелых металлов в донных отложениях [49].

Полученные концентрации $C_{орг}$ термокарстового озера лесотундровой зоны согласуются с полученными ранее данными для данной территории (3,6–31 %, [18]), озер района г. Салехард (3,4–7,0 %, [50]) и озер дельты р. Енисей (Таймырский полуостров) (4–12 %, [51]).

Содержание $C_{орг}$ в донных отложениях термокарстовых озер Гыданского полуострова в целом согласуется с концентрацией $C_{орг}$ в донных отложениях Гыданской губы (0,4–1,4 %, [52]), юго-западной части Карского моря (0,13–2,1 %, [53]) и Обской губы (0,04–1,9 %, [54]).

Средняя концентрация Fe в донных отложениях изученного нами термокарстового озера лесотундровой зоны в два раза меньше, чем указывалось ранее для термокарстовых озер данной территории [18], но соотносится со значениями концентрации для торфяных почв Западной Сибири [46],

донных отложений водосбора р. Большая Хета [55] и донных отложений Нижней Оби [56] (табл. 1).

Полученная средняя концентрация Mn соотносится с данными, полученными для термокарстовых озер данной территории [18] и для торфяных почв Западной Сибири [46], что свидетельствует о незначительном изменении концентраций Mn в донных отложениях термокарстовых озер в сравнении с почвами данного региона. Ранее было показано, что химический состав донных отложений малых континентальных озер данной территории унаследует состав почв и пород их водосборных площадей [57].

Динамика содержания Fe в донных отложениях озер тундровой зоны Западной Сибири в целом совпадает с динамикой содержания в них $C_{орг}$ и характеризуется высокими коэффициентами корреляции. Так, для озера RM57 ($R_{s_{Fe-C_{орг}}}=0,89$; Fe: 18841±5851 мг/кг); для озера RM58 ($R_{s_{Fe-C_{орг}}}=0,81$; Fe: 7156±2479 мг/кг); для озера RM55 ($R_{s_{Fe-C_{орг}}}=0,93$; Fe: 16655±4896 мг/кг).

Содержанием Mn характеризуется схожей динамикой: для озера RM57 ($R_{s_{Mn-C_{орг}}}=0,90$; Mn: 396±68,3 мг/кг); для озера RM55 ($R_{s_{Mn-POC}}=0,85$; Mn: 318,6±91 мг/кг); для озера RM58 корреляция Mn и POC составляет 0,20, но важно отметить, что для первых 10 см «органической части» $R_{s_{Mn-POC}}=0,81$ (Mn: 128,5±27,2 мг/кг).

Из табл. 1 видно, что концентрации тяжелых металлов и металлоидов находятся в определенной зависимости. Максимальные значения концентрации элементов характерны для RM57, RM55; минимальные значения – для RM64, RM58. По-видимому, это связано с типом питания озер.

Полученные высокие показатели корреляции концентраций химических элементов в донных от-

Табл. 1. Концентрации $C_{орг}$, тяжелых металлов и металлоидов (мг/кг) в донных отложениях изученных озер, в таблице показано стандартное отклонение ($\pm SD$); «–» – отсутствие данных

Table 1. Concentrations of $C_{орг}$, heavy metals and metalloids (mg/kg) in sediments of the studied lakes, the table shows the standard deviation ($\pm SD$); «–» – no data

Озеро Lake	Органический углерод ($C_{орг}$), % Organic carbon, %	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Pb
RM64	22,4±15,8	5230±2497	146,5±99	2,4±1,1	5,4±3,8	4,8±3,1	10,7±4,2	1,1±0,3	0,09±0,04	0,19±0,05	5,6±1,4
RM57	5,1±3,3	18841±5851	396±68,3	8,2±1,8	18,6±5,5	14±4,5	35,6±10	3,3±0,6	0,14±0,03	0,3±0,03	8,2±0,03
RM58	7,7±2,2	7156±2479	128,5±27,2	2,8±0,8	6,2±2,3	3±1,1	13,8±5,3	2,1±0,8	0,06±0,02	0,16±0,03	5,9±1,1
RM55	1,07±0,46	16655±4896	318,6±91	8±1,7	16,3±3,7	9,1±2,6	28,6±5,6	3,4±0,4	0,12±0,02	0,3±0,03	8,4±0,4
Термокарстовое озеро [18] Thermokarst lake [18]	27,3±4,1	11984±1232	148,5±16,5	5,9±0,14	14,8±0,76	8,4±1,4	24,8±4,6	3,9±0,7	0,15±0,06	0,17±0,1	7,2±1,04
Торфяные почвы севера Западной Сибири [41, 46] Peat soils of the northern part of Western Siberia [41, 46]	–	5800	184	4,2	6,8	4,9	17,8	0,52	0,04	0,21	4,8
Донные отложения рек [55, 66] Sediments of rivers [55, 66]	–	8124	470	6	10	26,5	44,5	3,8	0,11	–	10,5
Донные отложение Нижней Оби [56] Sediments of the Lower Ob [56]	–	3800	800	–	40	20	50	–	–	–	10

ложениях показывают, что их содержание регулируется содержанием S_{org} и типоморфных для данной территории элементов (Fe и Mn). Это связано с тем, что многие из изученных нами химических элементов способны образовывать металлоорганические соединения. Кроме того, отобранные донные отложения характеризуются высокой обводненностью и мелкодисперсностью, что может обуславливать их высокую сорбционную ёмкость.

Поровые воды

Поровые воды исследованных колонок донных отложений имеют кислую среду (табл. 2), характерную для озерных вод данного региона [58], pH варьирует от 3,53 до 5,01, что сопоставимо с более южными районами [59]. Во всех четырех изученных озерах в поровых водах донных отложений прослеживается снижение pH минимум на единицу по отношению к озерной воде, что может объясняться процессами сульфатредукции [18].

Для поровых вод отмечается закономерное увеличение электропроводности относительно озерных вод изученных озер, а также активное накопление хлоридов, сульфатов и РОУ. Особо активно накапливаются хлориды в озерах прибрежной зоны RM57 и RM55, что, вероятно, связано с влиянием морских аэрозолей. Данные озера (RM57 и RM55) также характеризуются максимальными значениями электропроводности. Элементный состав озерных вод исследованных озер опубликован ранее [60].

В поровой воде озера RM58 активно накапливаются сульфаты (5,6 мг/л), что существенно выше, чем в остальных изученных озерах, это может быть объяснено возможным влиянием подземных вод, а также возможным выветриванием пирита, содержащегося в окружающем озеро торфе [18].

Обсуждение

Соотношение концентрации химических элементов в макрофитах, произрастающих в разных природных зонах

Нами проведен анализ соотношения концентраций химических элементов в макрофитах, произрастающих в различных природных зонах и имеющих различное влияние окружающих условий. При этом мы усредняли значения концентраций химических элементов для всех видов растений, чтобы выявить общие закономерности в независимости от видовой специфичности. Нами сравнивались макрофиты, отобранные на Гыданском полуострове, окрестности п. Гыда (зона южной тундры, прибрежные территории) и окрестностей пос. Пангоды (зона лесотундры, континентальная часть). Полученные данные представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, что общие концентрации химических элементов в макрофитах, произрастающих в тундровой зоне, значительно выше, чем в лесотундровой. Это может быть обусловлено двумя факторами: 1) близостью Карского моря, влиянием морских аэрозолей, 2) различием субстратов, уменьшением мощности торфяной залежи с юга на север Западной Сибири. Минеральный горизонт в тундровой зоне залегает ближе к поверхности и сезонно-талому слою, в силу чего большее количество элементов может поглощаться корнями растений. В озерах континентальной части Западной Сибири происходит активное, по сравнению с тундровой зоной, накопление макрофитами Ba, Cd и Pb, что объясняется выщелачиванием данных химических элементов из торфяной толщи в процессе береговой абразии, а также присутствием данных элементов в биодоступной форме. Высокое содержание свинца в торфяной толще ранее было описано в [61, 62]. Отмечалось, что накопление Cd и Pb *M. trifoliata* не зависит от трофности водоема,

Таблица 2. Физико-химические показатели озерных и поровых вод изученных озер

Table 2. Physicochemical parameters of lake and pore waters of the studied lakes

Озеро Lake	Координаты Coordinates	Площадь озера, м ² Surface lake area, m ²	Образец Samples	pH	Электропровод- ность, мкСм/см Conductivity, μS/cm	Растворенный органический углерод Dissolved organic carbon		
						мг/л (mg/L)		
RM64	6°52'22,3"/74°58'13,8"	113354	Озерная вода Lake waters	5,24	22,6	12,4	0,14	0,15
			Поровая вода Pore waters	3,53	33,3	46,7	1,66	1,27
RM57	70°53'16,3"/78°22'41,8"	196250	Озерная вода Lake waters	6,5	115	4,35	1,9	0,07
			Поровая вода Pore waters	4,72	124,5	20,3	23,3	1,86
RM58	70°53'16,1"/78°25'0,6"	13266,5	Озерная вода Lake waters	6,48	43,5	7,54	0,6	0,17
			Поровая вода Pore waters	5,01	59,2	34,2	2,8	5,6
RM55	70°53'29,9"/78°22'14"	31400	Озерная вода Lake waters	6,19	43,5	3,2	1,64	0,16
			Поровая вода Pore waters	4,68	222,1	14,4	53,6	0,66

а обусловлено содержанием данных элементов в среде [45]. Концентрации кальция, калия, магния, марганца и меди, играющих важную роль в протекании физиологических процессов, в растениях лесотундровой зоны значительно ниже, что объясняется высоким содержанием в них свинца, который ингибирует потребление данных элементов растениями [63].

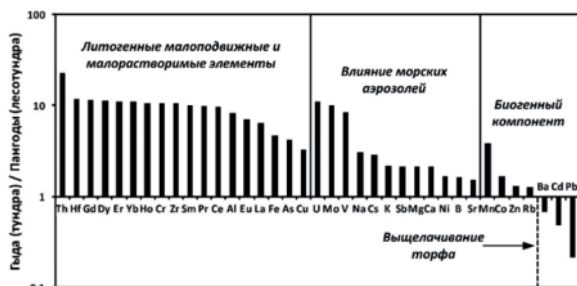


Рис. 4. Соотношение усредненных концентраций химических элементов в макрофитах окр. п. Гыда и п. Пангоды

Fig. 4. Ratio of average concentrations of chemical elements in macrophytes of the Gyda and Pangody areas

Видовые особенности концентрационной функции макрофитов по отношению к тяжелым металлам

Разные виды растений обладают различной селективной способностью к накоплению тяжелых металлов как наиболее опасных компонентов атмосферных выбросов и индикаторов антропогенной нагрузки на территорию.

Для характеристики видовых особенностей концентрационной функции макрофитов целесообразно использовать относительное содержание химических элементов в растениях. Для этого нами был рассчитан Коэффициент специфического относительного накопления (КСОН) [64]. КСОН показывает способность растения давать информацию о содержании химических элементов в среде и вычисляется как отношение содержания элемента в растении к среднему содержанию этого элемента во всех других растениях, растущих на одной территории и в одинаковых условиях. В табл. 3 приведены значения КСОН для шести изученных видов макрофитов по отношению концентраций в них тяжелых металлов (жирным шрифтом выделены значения КСОН > 2, указывающие на индикаторную функцию макрофитов).

Как видно из табл. 3, самым подходящим фитоиндикатором для Fe, Co, As является *H. vulgaris*. Для Sb – *G. maxima*. *Comarum palustre* может являться фитоиндикатором для Ni, Cu и Cd. Повышенное по сравнению с другими видами макрофитов содержание марганца характерно для *Comarum palustre* и *R. spitzbergensis*. Свинец и кадмий наиболее активно накапливаются в *M. trifoliata*.

Важно отметить, что индикаторную функцию по отношению к концентрации редкоземельных элементов может выполнять *Comarum palustre*. Значение КСОН данного растения для РЗЭ варьи-

руют от 3,5 до 5,72, что в среднем в четыре раза превышает показатели КСОН для других видов исследованных растений.

Таблица 3. Коэффициент специфического относительного накопления тяжелых металлов и металлоидов в макрофитах

Table 3. Coefficient of specific relative accumulation of heavy metals and metalloids in macrophytes

Макрофиты Macrophytes	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sb	Pb	Cd
<i>Hippuris vulgaris</i>	1,50	6,58	3,08	0,71	1,41	1,44	4,53	1,04	0,67	1,57
<i>Glyceria maxima</i>	0,25	1,06	0,38	0,64	0,71	0,42	1,16	2,23	1,70	0,22
<i>Comarum palustre</i>	2,03	0,58	0,94	3,59	2,06	0,83	0,88	1,85	0,48	2,20
<i>Ranunculus spitzbergensis</i>	2,32	0,52	1,75	1,16	1,45	0,94	0,52	0,34	0,06	0,48
<i>Carex aquatilis</i>	0,35	0,09	0,13	0,26	0,45	1,80	0,25	0,55	0,26	0,17
<i>Menyanthes trifoliata</i>	0,26	0,21	0,59	0,60	0,31	0,77	0,24	0,47	4,61	2,08

Коэффициенты накопления химических элементов в макрофитах термокарстовых озер Западной Сибири

В ходе работы были посчитаны коэффициенты биологического накопления химических элементов в макрофитах четырех ключевых изученных озер относительно донных отложений (BF_s) и поровых вод (BF_{pw}), данный подход является общепринятым [3, 65, 66 и др.].

Коэффициенты биологического накопления рассчитывались как отношение концентрации химического элемента в растении к его концентрации в среде. Для удобства восприятия масштаба значений BF_{pw} был умножен на 10000. Коэффициенты биологического накопления химических элементов в макрофитах схожи во всех изученных озерах и характеризуются общей динамикой ($R_s=0,9\pm 0,02$; $p<0,05$).

Как видно из табл. 4, все виды макрофитов активно накапливают макроэлементы, необходимые в процессе онтогенеза (K/Rb, Na, Mg, Ca), при этом ранее утверждалось о пассивном накоплении Na и Ca растениями ($BF<1$) [67], однако в нашем исследовании *R. spitzbergensis* и *H. vulgaris* активно накапливают натрий относительно донных отложений ($BF_s=1,28$ и $3,25$, соответственно). Неактивное потребление Na в силу его физиологической роли было описано ранее [68], при этом в данном исследовании наблюдается активное накопление Na, это может объясняться тем, что в тундровой зоне Na находится в больших количествах в растворенной форме (морское влияние). Высокое накопление Rb наравне с K объясняется их физиологической схожестью, т. к. Rb может отчасти замещать позиции калия в соединениях, хотя высокие его концентрации довольно токсичны для растений [69].

Наиболее активно в *M. trifoliata* ($BF_s=5,55$) и *H. vulgaris* ($BF_s=6,62$) накапливается Zn, что может быть объяснено его повышенными концентрациями во всех изученных донных отложениях. Ра-

Таблица 4. Химические элементы, активно накапливающиеся в изученных макрофитах, ($BF > 1$)

Table 4. Chemical elements actively accumulated in the studied macrophytes, ($BF > 1$)

Макрофиты Macrophytes	BF	Макроэлементы+Rb Macronutrients+Rb				Тяжелые металлы и металлоиды Heavy metals and metalloids								
<i>M. trifoliata</i>	BF_s	K 3,24	Mg 3,08	Rb 1,95	Ca 1,86	Zn 5,55	Mn 3,74	Co 2,15	Cd 1,75	As 1,49	Ni 1,39	B 2,05		
	BF_{pw}	K 4,45	Rb 2,48											
<i>R. spitzbergensis</i>	BF_s	K 2,38	Rb 1,29	Na 1,28	Ca 1,13	Mn 3,76	Mo 1,74	Zn 1,54				B1		
	BF_{pw}	Rb 13,7	K 5,46			Mn 21,2	Cs 1,79	Fe 1,13						
<i>H. vulgaris</i>	BF_s	Na 3,25	Mg 3,17	Ca 3,11	K 2,92	Rb 1,66	Zn 6,62	Mn 4,61	Cu 2,53	Fe 2,51	Co 2,17	As 1,75	Cd 1,33	B 6,56
	BF_{pw}	K 2,73	Rb 2,64	Ca 1,15			Mn 2,68	Sr 1,33	Zn 1,19					
<i>G. maxima</i>	BF_s						Mo 2,32							
	BF_{pw}	Rb 1,11					Pb 8,16	Fe 1,3						

нее было описано, что потребление цинка растениями увеличивается, если повышается его концентрация в окружающих средах [69].

Высокое накопление Mn характерно для *M. trifoliata*, *R. spitzbergensis* и *H. vulgaris*. Дополнительным фактором повышенной концентрации Mn в макрофитах может являться повышенный pH озерных вод и более интенсивное протекание фотосинтеза, приводящее к окислению Mn^{2+} до Mn^{4+} на поверхности клеток [40]. Локальное повышение pH на поверхности макрофитов термокарстовых озер было недавно продемонстрировано измерениями in-situ с высоким разрешением [70].

Ранее было описано, что в растениях, растущих на кислых почвах, содержание молибдена ниже, чем в растениях, произрастающих на нейтральных почвах [67]. В нашей работе активное накопление Mo в *R. spitzbergensis* и *G. maxima*, произрастающих в слабокислой среде термокарстовых озер тундровой зоны, может быть объяснено влиянием морских аэрозолей.

M. trifoliata и *H. vulgaris* характеризуются накоплением токсичных тяжелых металлов, таких как Co, Cd, As, Ni, относительно донных отложений, что может указывать на их фиторемедиационную функцию в отношении данных элементов.

Увеличение накопления бора относительно донных отложений может быть объяснено его подвижностью в поровой воде и присутствием в растворенной форме.

Накопление РЗЭ макрофитами относительно донных отложений не зависит от зоны их произрастания и описывается рядом убывания *H. vulgaris* > *M. trifoliata* > *R. spitzbergensis* > *G. maxima*, данная тенденция характерна для всех РЗЭ.

Из вышеописанного следует, что всеми изученными видами макрофитов активнее по сравнению с донными отложениями ($BF_s > BF_{pw}$, при $BF > 1$) накапливаются следующие химические элементы: B, Na, Mg, Ca, Ni, Cu, Zn, Mo.

Накопление химических элементов макрофитами относительно поровых вод характеризуется единичными высокими показателями коэффициента.

Активное накопление свинца *G. maxima* относительно поровой воды ($BF_{pw}=8,16$), который обладает высокой биоаккумуляционной активностью в водной среде [71], может говорить о его специфичности по отношению к данному элементу.

Для *M. trifoliata* характерно более активное накопление K и Rb относительно поровых вод донных отложений ($BF_{pw}=4,45$ и $2,48$, соответственно). *R. spitzbergensis* очень активно накапливает из поровой воды: K, Mn, Fe, Cs (значения BF_{pw} более чем в 2–7 раз выше BF_s) и менее активно Rb. Особенностью данного вида может являться очень активное накопление марганца относительно поровой воды ($BF_{pw}=21,16$). *G. maxima* очень активно накапливает свинец относительно поровой воды ($BF_{pw}=8,16$), а также железо.

Важно отметить, что только рубидий активно накапливается во всех макрофитах относительно поровой воды.

Выводы

Макрофитами термокарстовых озер севера Западной Сибири активно накапливаются относительно донных отложений макроэлементы (Na, Mg, Ca), некоторые тяжелые металлы и металлоиды (Ni, Cu, Zn, Co, As, Cd), а также B и Mo. Высокие BF тяжелых металлов могут говорить о существенной фиторемедиационной функции растений-макрофитов данной территории. Накопление остальных химических элементов относительно поровых вод и осадков является индивидуальным для каждого вида и может говорить о видоспецифичности данных растений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-10067).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prasad M.N.V., Greger M., Aravind P. Biogeochemical cycling of trace elements by aquatic and wetland plants: relevance to phytoremediation // *Traces elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology and bioremediation* / Eds. M.N.V. Prasad, Sajvan K.S., Naidu R. – Boca Raton, London, New York: CRC Taylor & Francis (Taylor & Francis Group, LLC), 2006. – P. 451–482.
2. Rai P.K. Heavy Metal Phytoremediation from Aquatic Ecosystems with Special Reference to Macrophytes // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2009. – V. 39. – № 9. – P. 697–753.
3. Bonanno G., Borg J.A., Di Martino V. Levels of heavy metals in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: A comparative assessment // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 576. – P. 796–806.
4. Bonanno G., Vymazal J. Compartmentalization of potentially hazardous elements in macrophytes: Insights into capacity and efficiency of accumulation // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – V. 181. – P. 22–30.
5. Bonanno G. Trace element accumulation and distribution in the organs of *Phragmites australis* (common reed) and biomonitoring applications // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2011. – V. 74. – № 4. – P. 1057–1064.
6. Assessment of macro and microelement accumulation capability of two aquatic plants / D. Baldantoni, A. Alfani, P. Di Tommasi, G. Bartoli, A.V. De Santo // *Environmental Pollution*. – 2004. – V. 130. – P. 149–156.
7. Kumar J.I.N., Soni H., Kumar R.N. Biomonitoring of selected freshwater macrophytes to assess lake heavy metal contamination: a case study of Nal Sarovar Bird Sanctuary, Gujarat, India // *Journal of Limnology*. – 2006. – V. 65. – P. 9–16.
8. Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes / V.K. Mishra, A.R. Upadhyaya, S.K. Pandey, B.D. Tripathi // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99. – P. 930–936.
9. Seasonal courses of nutrients and heavy metals in water, sediment and above and below-ground *Typha domingensis* biomass in Lake Burullus (Egypt): Perspectives for phytoremediation / E.M. Eid, K.H. Shaltout, M.A. El-Sheikh, T. Asaeda // *Flora*. – 2012. – V. 207. – № 11. – P. 783–794.
10. Bioaccumulation of zinc, lead, copper, and cadmium from contaminated sediments by native plant species and *Acrida cinerea* in South China / C. Zhang, N. Song, G.-M. Zeng, M. Jiang, J.-C. Zhang, X.-J. Hu, A.-W. Chen, J.-M. Zhen // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2014. – V. 186. – P. 1735–1745.
11. Multiple tracers demonstrate distinct sources of dissolved organic matter to lakes of the Mackenzie Delta, western Canadian Arctic / S.E. Tank, L.F.W. Lesack, J.A.L. Gareis, C.L. Osburn, R.H. Hesslein // *Limnology and Oceanography*. – 2011. – V. 56. – № 4. – P. 1297–1309.
12. Squires M.M., Lesack L.F.W., Huebert D. The influence of water transparency on the distribution and abundance of macrophytes among lakes of the Mackenzie Delta, Western Canadian Arctic // *Freshwater Biology*. – 2002. – V. 47. – P. 2123–2135.
13. Squires M.M., Lesack L.F.W. The relation between sediment nutrient content and macrophyte biomass and community structure along a water transparency gradient among lakes of the Mackenzie Delta // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 2003. – V. 60. – P. 333–343.
14. Mesquita P.S., Wrona F.J., Prowse T.D. Effects of retrogressive permafrost thaw slumping on sediment chemistry and submerged macrophytes in Arctic tundra lakes // *Freshwater Biology*. – 2010. – V. 55. – P. 2347–2358.
15. Slow growth and decomposition of mosses in Arctic lakes / K. Sand-Jensen, T. Riis, S. Markager, W.F. Vincent // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 1999. – V. 56. – P. 388–393.
16. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Changes in thermokarst lake size in different regions of Russia for the last 30 years // *Earth's Cryosphere*. – 2009. – V. 13. – № 2. – P. 16–26.
17. Size Distribution, Surface Coverage, Water, Carbon, and Metal Storage of Thermokarst Lakes in the Permafrost Zone of the Western Siberia Lowland / Y.M. Polishchuk, A.N. Bogdanov, V.Y. Polishchuk, R.M. Manasyppov, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, O.S. Pokrovsky // *Water*. – 2017. – V. 9. – Article 228.
18. Organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lake sediments / S. Audry, O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, B. Dupré // *Biogeosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 3341–3358.
19. Савченко Н.В. Природа озер Западно-Сибирской субарктики // *География и природные ресурсы*. – 1992. – № 1. – С. 85–92.
20. Polechońska L., Klink A. Accumulation and distribution of macroelements in the organs of *Phalaris arundinacea* L.: Implication for phytoremediation // *Journal of Environmental Science and Health. P. A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. – 2014. – V. 49. – № 12. – P. 1385–1391.
21. Jackson L.J., Kalf J., Rasmussen J.B. Sediment pH and redox potential affect the bioavailability of Al, Cu, Fe, Mn, and Zn to rooted aquatic macrophytes // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 1993. – V. 50. – P. 143–148.
22. Size fractionation of trace elements in a seasonally stratified boreal lake: control of organic matter and iron colloids / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.A. Zabelina, T.Y. Vorobeva, O.Yu. Moreva, S.I. Klimov, A. Chupakov, N.V. Shorina, N.M. Kokryatskaya, S. Audry, J. Viers, C. Zouten, R. Freydisier // *Aquatic Geochemistry*. – 2012. – V. 18. – P. 115–139.
23. Trace elements in organic- and iron-rich surficial fluids of the boreal zone: Assessing colloidal forms via dialysis and ultrafiltration / E.V. Vasuykova, O.S. Pokrovsky, J. Viers, P. Oliva, B. Dupré, F. Martin, F. Candaudap // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2010. – V. 74. – № 2. – P. 449–468.
24. Свириденко Б.Ф., Мамотнов Ю.С., Свириденко Т.В. Использование гидромакрофитов в комплексной оценке экологического состояния водных объектов Западно-Сибирской равнины. – Омск: Амфора, 2011. – 231 с.
25. Конспект флоры Сибири: Сосудистые растения / сост. Л.И. Малышев, Г.А. Пешкова, К.С. Байков и др. – Новосибирск: Наука, 2005. – 362 с.
26. Macro- and microelement distribution in organs of *Glyceria maxima* and biomonitoring applications / A. Kling, A. Stankiewicz, M. Wislocka, L. Polechońska // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2014. – V. 186. – P. 4057–4065.
27. Trace metal concentrations and their transfer from sediment to leaves of four common aquatic macrophytes / R. Lojko, L. Polechońska, A. Klink, P. Kosiba // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – V. 22. – № 19. – P. 15123–15131.
28. Golubev S.V., Efremov A.A. A Study of the Mineral Composition and the Composition of Volatiles of Marsh Cinquefoil // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. – 2013. – V. 39. – № 7. – P. 728–732.
29. Kashchenko N.I., Chirikova N.K., Olennikov D.N. Agrimoniin, an active ellagitannin from *Comarum palustre* herb with anti- α -glucosidase and antidiabetic potential in streptozotocin-induced diabetic rats // *Molecules*. – 2017. – V. 22. – № 1. – Article 73.
30. Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater / S. Khan, I. Ahmad, M.T. Shah, S. Rehman, A. Khaliq // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – V. 90. – P. 3451–3457.
31. Sidenko N.V., Khozhina E.I., Sherriff B.L. The cycling of Ni, Zn, Cu in the system «mine tailing-ground water-plants»: a case study // *Applied Geochemistry*. – 2007. – V. 22. – P. 30–52.

32. Arp C.D., Cooper D.J., Stednick J.D. The effects of acid rock drainage on *Carex aquatilis* leaf litter decomposition in rocky mountain fens // *Wetlands*. – 1999. – V. 19. – № 3. – P. 665–674.
33. Паршина Е.К. Деструкция растительного вещества в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Томск, 2009. – 24 с.
34. Konieczynski P., Wesolowski M. Total phosphorus and its extractable form in plant drugs. Interrelation with selected micro- and macroelements // *Food Chemistry*. – 2007. – V. 103. – P. 210–216.
35. Kashin V.K. Vitaly Important Microelements in Transbaikalian Herbs // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2009. – V. 17. – P. 371–381.
36. Kashin V.K. Conditionally Essential Microelements in the Medicinal Herbs of Transbaikalia // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2011. – V. 19. – P. 237–244.
37. Leonova G.A., Anoshin G.N., Bychinskii V.A. Document Anthropogenic chemical transformation of aquatic ecosystems: Biogeochemical problems // *Geochemistry International*. – 2005. – V. 43. – № 2. – P. 153–167.
38. Московченко Д.В., Моисеева И.Н., Хозяинова Н.В. Элементный состав растений Уренгойских тундр // *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. – 2012. – № 12. – С. 130–136.
39. Vardanyan L.G., Ingole B.S. Studies on heavy metal accumulation in aquatic macrophytes from Sevan (Armenia) and Carambolim (India) lake systems // *Environment International*. – 2006. – V. 32. – P. 208–218.
40. Features of the elemental composition of plants of northern West Siberian palsas / R.M. Manasyrov, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, N.S. Zinner // *International Journal of Environmental Studies*. – 2014. – V. 71. – № 5. – P. 678–684.
41. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage / V.A. Stepanova, O.S. Pokrovsky, J. Viers, N.P. Mironycheva-Tokareva, N.P. Kosykh, E.K. Vishnyakova // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 53. – P. 53–70.
42. Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers / O.S. Pokrovsky, R.M. Manasyrov, S. Loiko, L.S. Shirokova, I.A. Krivtsov, B.G. Pokrovsky, L.G. Kolesnichenko, S.G. Kopysov, V.A. Zemtsov, S.P. Kulizhsky, S.N. Vorobiev, S.N. Kirpotin // *Biogeosciences*. – 2015. – V. 12. – № 21. – P. 6301–6320.
43. Dissolved organic carbon and major and trace elements in peat porewater of sporadic, discontinuous, and continuous permafrost zones of western Siberia / T.V. Raudina, S.V. Loiko, A.G. Lim, I.V. Krickov, L.S. Shirokova, G.I. Istigechev, D.M. Kuzmina, S.P. Kulizhsky, S.N. Vorobyev, O.S. Pokrovsky // *Biogeosciences*. – 2017. – V. 14. – № 14. – P. 3561–3584.
44. Seasonal dynamics of organic carbon and metals in thermokarst lakes from the discontinuous permafrost zone of western Siberia / R.M. Manasyrov, S.N. Vorobyev, S.V. Loiko, I.V. Kritzkov, L.S. Shirokova, V.P. Shevchenko, S.N. Kirpotin, S.P. Kulizhsky, L.G. Kolesnichenko, V.A. Zemtsov, V.V. Sinkin, O.S. Pokrovsky // *Biogeosciences*. – 2015. – V. 12. – P. 3009–3028.
45. Исследование исходного сырья на содержание тяжелых металлов / Н.С. Субботина, С.Е. Дмитрук, Л.Г. Бабешина, Н.В. Келус, Л.А. Никифоров, Г.Н. Носкова, М.И. Тартынова // *Вестник НГУ. Серия: Биология, клиническая медицина*. – 2010. – Т. 8. – № 3. – С. 92–97.
46. Московченко В.Д. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // *География и природные ресурсы*. – 2006. – Т. 1. – С. 63–70.
47. Московченко Д.В., Валеева Э.И. Содержание тяжелых металлов в лишайниковом покрове на севере Западной Сибири // *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. – 2011. – № 11. – С. 162–172.
48. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Khozhina E.I. Distribution of radionuclides and trace elements in the lichen cover of west siberian regions // *Geologiya i Geofizika*. – 2005. – V. 46. – № 2. – P. 206–216.
49. Chemical composition of bottom sedimentary deposits in lakes in the zone impacted by atmospheric emissions from the Severonickel Plant / V.A. Dauvalter, M.V. Dauvalter, N.A. Kashulin, S.S. Sandimirov // *Geochemistry International*. – 2010. – V. 48. – № 11. – P. 1148–1153.
50. A depositional history of particulate organic carbon in a floodplain lake from the lower Ob' River, Siberia / A.F. Dickens, J. Baldock, T.C. Kenna, T.I. Eglinton // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – V. 75. – P. 4796–4815.
51. A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia) / A.P. Fedotov, M.A. Phedorin, I.V. Enushchenko, K.E. Vershinin, M.S. Melgunov, T.V. Khodzher // *Global and Planetary Change*. – 2012. – V. 98–99. – P. 139–152.
52. Organic components in bottom sediments from the lower Yenisei, the Gyda Bay, and the Kara Sea shelf / L.Z. Granina, E.L. Goldberg, V.S. Panov, N.N. Sushenzeva, Yu.V. Sryvkina, T.V. Khodzher // *Earth's Cryosphere*. – 2011. – V. 15. – № 4. – P. 87–90.
53. Belyaev N.A., Peresyppkin V.I., Ponyaev M.S. The organic carbon in the water, the particulate matter, and the upper layer of the bottom sediments of the west Kara Sea // *Oceanology*. – 2010. – V. 50. – № 5. – P. 706–715.
54. Organic matter in the bottom sediments of the Ob Bay: Distribution, nature, and sources / V.I. Petrova, G.I. Batova, A.V. Kursheva, I.V. Litvinenko, D.A. Konovalov // *Geochemistry International*. – 2010. – V. 48. – № 2. – P. 140–151.
55. Savichev O.G., Kolesnichenko L.G., Saifulina E.V. The ecogeochemical state of water bodies in the Taz-Yenisei interfluvium // *Geography and Natural Resources*. – 2011. – V. 32. – № 4. – P. 333–336.
56. Уварова В.И. Гидрохимическая характеристика водотоков Нижней Оби // *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. – 2011. – Вып. 3. – С. 132–142.
57. The regularities of distribution of radionuclides and rare-earth elements in bottom sediments of Siberian lakes / V.D. Strakhovenko, B.L. Shcherbov, I.N. Malikova, Y. Vosel' // *Russian Geology and Geophysics*. – 2010. – V. 51. – P. 1167–1178.
58. Abrupt permafrost collapse enhances organic carbon, CO₂, nutrient and metal release into surface waters / S.V. Loiko, O.S. Pokrovsky, T.V. Raudina, A. Lim, L.G. Kolesnichenko, L.S. Shirokova, S.N. Vorobyev, S.N. Kirpotin // *Chemical Geology*. – 2017. – V. 471. – № 5. – P. 153–165.
59. Relationships between vegetation succession, pore water chemistry and CH₄ and CO₂ production in a transitional mire of Western Siberia (Tyumen Oblast) / T.-M. Wertebach, K.-H. Knorr, M. Lordieck, N. Tretiakov, C. Blodau, N. Hölzel, T. Kleinebecker // *Wetlands*. – 2016. – V. 36. – P. 863–874.
60. Thermokarst lake waters across the permafrost zones of western Siberia / R.M. Manasyrov, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, L.S. Shirokova // *The Cryosphere*. – 2014. – V. 8. – № 4. – P. 1177–1193.
61. Shotyk W. The chronology of anthropogenic, atmospheric Pb deposition recorded by peat cores in three minerogenic peat deposits from Switzerland // *Science of the Total Environment*. – 2002. – V. 292. – P. 19–31.
62. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // *Ecological Engineering*. – 2015. – V. 80. – P. 100–107.
63. Веретеников А.В. Физиология растений с основами биохимии. – Воронеж: ВГУ, 1987. – 256 с.
64. Kabata-Pendias A., Krakowiak A. Useful phytoindicator (Dandelion) for trace metal pollution // 5th International conference proce-

- edings: Transport, fate and effects of silver in the environment. – Hamilton, Ontario, Canada, 1998. – P. 145–149.
65. Long-term (two annual cycles) phytoremediation of heavy metal-contaminated estuarine sediments by *Phragmites australis* / D. Cicero-Fernández, M. Peña-Fernández, J.A. Expósito-Camarago, B. Antizar-Ladislao // *New Biotechnology*. – 2017. – V. 38. – P. 56–64.
66. Spatial patterns of heavy metal accumulation in sediments and macrophytes of Bellandur wetland, Bangalore / T.V. Ramachandra, P.B. Sudarshan, M.K. Mahesh, S. Vinay // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – V. 206. – P. 1204–1210.
67. Barker A.V., Pilbeam D.J. *Handbook of Plant Nutrition*. – Boca Raton; London; New York: Taylor & Francis Group, 2007. – 613 p.
68. Vymazal J., Svehla J. Removal of alkali metals and their sequestration in plants in constructed wetlands treating municipal sewage // *Hydrobiologia*. – 2012. – V. 692. – № 1. – P. 131–143.
69. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
70. pH gradients in the diffuse boundary layer of subarctic macrophytes / I.E. Hendriks, C.M. Duarte, N. Marbà, D. Krause-Jensen // *Polar Biology*. – 2017. – V. 40. – № 12. – P. 2343–2348.
71. Kabata-Pendias A. Soil–plant transfer of trace elements – an environmental issue // *Geoderma*. – 2004. – V. 122. – P. 143–149.

Поступила 01.03.2018 г.

Информация об авторах

Манасыпов Р.М., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Биологического института Томского государственного университета; старший научный сотрудник лаборатории пресноводных и морских экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова РАН.

Покровский О.С., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Биологического института Томского государственного университета; ведущий научный сотрудник лаборатории пресноводных и морских экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова РАН; ведущий научный сотрудник Национального центра научных исследований.

Широкова Л.С., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории пресноводных и морских экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова РАН; старший научный сотрудник Национального центра научных исследований.

Кирпотин С.Н., доктор биологических наук, заместитель заведующего лабораторией биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Биологического института Томского государственного университета.

Зиннер Н.С., кандидат биологических наук, доцент кафедры сельскохозяйственной биологии Томского государственного университета.

UDC 550.47

ELEMENTAL COMPOSITION OF MACROPHYTES OF THERMOKARST LAKES IN WESTERN SIBERIA

Rinat M. Manasypov^{1,2},
rmmanassypov@gmail.com

Oleg S. Pokrovsky^{1,2,3},
oleg.pokrovski@get.omp.eu

Lyuidmila S. Shirokova^{2,3},
liudmila.shirokova@get.omp.eu

Sergey N. Kirpotin¹,
kirp@mail.tsu.ru

Nadezhda S. Zinner¹,
Tzinner@inbox.ru

¹ Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634004, Russia.

² Federal Center for Integrated Arctic research,
23, Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163000, Russia.

³ GET UMR 5563 CNRS University of Toulouse,
14, Edouard Belin Avenue, Toulouse, 31400, France.

Relevance. *Macrophytes are one of the key participants in accumulation of chemical elements in lake ecosystems, but despite this, the issue of elemental composition of macrophytes of thermokarst lakes in Western Siberia and accumulation of chemical elements relative to the sediments and pore water remains practically unexplored.*

The aim of the research is to describe the formation of elemental composition of macrophyte species of thermokarst lakes in the north of Western Siberia and to identify the possibility of their use in biomonitoring.

The objects of research were macrophyte plants (*Hippuris vulgaris* L., *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., *Comarum palustre* L., *Ranunculus spitzbergensis* Hadac, *Carex aquatilis* Wahlenb s. Str., *Menyanthes trifoliata* L.), sediments and pore waters of thermokarst lakes of the north of Western Siberia.

Methods. *The elemental composition of the samples was studied by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS, Agilent Technologies, 7500 se), the concentration of anions in water samples was determined by liquid chromatography (Dionex ICS-2000), the dissolved organic carbon was defined by infrared spectroscopy TOC-VCSN, Shimadzu), the organic carbon content of the sediments was determined by infrared spectrometry (Horiba Jobin Yvon Emia-320V C/S Analyzer). Statistical processing of data was carried out using the STATISTICA 6.0 software package.*

Results. *The coefficients of biological accumulation of chemical elements in macrophytes relative to sediments and pore water were calculated for four key thermokarst lakes. It has been shown that macronutrients (Na, Mg, Ca), some heavy metals and metalloids (Ni, Cu, Zn, Co, As, Cd), as well as B and Mo are actively accumulated in water plants of thermokarst lakes of Western Siberia. High coefficients of accumulation of heavy metals indicate a significant phytoremediation function of macrophytes in a given territory.*

Key words:

Thermokarst lakes, Western Siberia, macrophytes, sediments, pore water, trace elements, bioaccumulation factor.

The research was supported by the RSF (RNF) (grant no. 17-77-10067).

REFERENCES

1. Prasad M.N.V., Greger M., Aravind P. Biogeochemical cycling of trace elements by aquatic and wetland plants: relevance to phytoremediation. *Traces elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology and bioremediation*. Eds. M.N.V. Prasad, Sajvan K.S., Naidu R. Boca Raton, London, New York, CRC Taylor & Francis (Taylor & Francis Group, LLC), 2006. pp. 451–482.
2. Rai P.K. Heavy Metal Phytoremediation from Aquatic Ecosystems with Special Reference to Macrophytes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2009, vol. 39, no. 9, pp. 697–753.
3. Bonanno G., Borg J.A., Di Martino V. Levels of heavy metals in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: A comparative assessment. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 576, pp. 796–806.
4. Bonanno G., Vymazal J. Compartmentalization of potentially hazardous elements in macrophytes: Insights into capacity and efficiency of accumulation. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 181, pp. 22–30.
5. Bonanno G. Trace element accumulation and distribution in the organs of *Phragmites australis* (common reed) and biomonitoring applications. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, vol. 74, no. 4, pp. 1057–1064.
6. Baldantoni D., Alfani A., Di Tommasi P., Bartoli G., De Santo A.V. Assessment of macro and microelement accumulation capability of two aquatic plants. *Environmental Pollution*, 2004, vol. 130, pp. 149–156.
7. Kumar J.I.N., Soni H., Kumar R.N. Biomonitoring of selected freshwater macrophytes to assess lake heavy metal contamination.

- tion: a case study of Nal Sarovar Bird Sanctuary, Gujarat, India. *Journal of Limnology*, 2006, vol. 65, pp. 9–16.
8. Mishra V.K., Upadhyaya A.R., Pandey S.K., Tripathi B.D. Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, pp. 930–936.
 9. Eid E.M., Shaltout K.H., El-Sheikh M.A., Asaeda T. Seasonal courses of nutrients and heavy metals in water, sediment and above and below-ground *Typha domingensis* biomass in Lake Burulus (Egypt): Perspectives for phytoremediation. *Flora*, 2012, vol. 207, no. 11, pp. 783–794.
 10. Zhang C., Song N., Zeng G.-M., Jiang M., Zhang J.-C., Hu X.-J., Chen A.-W., Zhen J.-M. Bioaccumulation of zinc, lead, copper, and cadmium from contaminated sediments by native plant species and *Acrida cinerea* in South China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, pp. 1735–1745.
 11. Tank S.E., Lesack L.F.W., Gareis J.A.L., Osburn C.L., Hesselein R.H. Multiple tracers demonstrate distinct sources of dissolved organic matter to lakes of the Mackenzie Delta, western Canadian Arctic. *Limnology and Oceanography*, 2011, vol. 56, no. 4, pp. 1297–1309.
 12. Squires M.M., Lesack L.F.W., Huebert D. The influence of water transparency on the distribution and abundance of macrophytes among lakes of the Mackenzie Delta, Western Canadian Arctic. *Freshwater Biology*, 2002, vol. 47, pp. 2123–2135.
 13. Squires M.M., Lesack L.F.W. The relation between sediment nutrient content and macrophyte biomass and community structure along a water transparency gradient among lakes of the Mackenzie Delta. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, vol. 60, pp. 333–343.
 14. Mesquita P.S., Wrona F.J., Prowse T.D. Effects of retrogressive permafrost thaw slumping on sediment chemistry and submerged macrophytes in Arctic tundra lakes. *Freshwater Biology*, 2010, vol. 55, pp. 2347–2358.
 15. Sand-Jensen K., Riis T., Markager S., Vincent W.F. Slow growth and decomposition of mosses in Arctic lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, vol. 56, pp. 388–393.
 16. Kravtsova V.I., Bystrova A.G. Changes in thermokarst lake size in different regions of Russia for the last 30 years. *Earth's Cryosphere*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 16–26.
 17. Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Polishchuk V.Y., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Pokrovsky O.S. Size Distribution, Surface Coverage, Water, Carbon, and Metal Storage of Thermokarst Lakes in the Permafrost Zone of the Western Siberia Lowland. *Water*, 2017, vol. 9, article no. 228.
 18. Audry S., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Dupré B. Organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lake sediments. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 3341–3358.
 19. Savchenko N.V. Nature of lakes in subarctic of West Siberia. *Geography and Natural Resources*, 1992, vol. 1, pp. 85–92. In Rus.
 20. Polechońska L., Klink A. Accumulation and distribution of macroelements in the organs of *Phalaris arundinacea* L.: Implication for phytoremediation. *Journal of Environmental Science and Health. P.A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2014, vol. 49, no. 12, pp. 1385–1391.
 21. Jackson L.J., Kalff J., Rasmussen J.B. Sediment pH and redox potential affect the bioavailability of Al, Cu, Fe, Mn, and Zn to rooted aquatic macrophytes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, vol. 50, pp. 143–148.
 22. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Zabelina S.A., Vorobieva T.Y., Moreva O.Yu., Klimov S.I., Chupakov A., Shorina N.V., Kokryatskaya N.M., Audry S., Viers J., Zouten C., Freydier R. Size fractionation of trace elements in a seasonally stratified boreal lake: control of organic matter and iron colloids. *Aquatic Geochemistry*, 2012, vol. 18, pp. 115–139.
 23. Vasyukova E.V., Pokrovsky O.S., Viers J., Oliva P., Dupré B., Martin F., Candaudap F. Trace elements in organic- and iron-rich surficial fluids of the boreal zone: Assessing colloidal forms via dialysis and ultrafiltration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, vol. 74, no. 2, pp. 449–468.
 24. Sviridenko B.F., Mamotnov Yu.S., Sviridenko T.S. *Ispolzovanie gidromakrofitov v kompleksnoy otsenke ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh obektov Zapadno-Sibirskoy ravny* [Using hydromacrophytes in complex assessment of ecological condition of water bodies of the West Siberian Plain]. Omsk, Amfora Publ., 2011. 231 p.
 25. Malyshev L.I., Peshkova G.A., Baykov K.S., Nikiforova O.D., Vlasova N.V., Doronkin N.V., Zuev V.V., Kovtonyuk N.K., Ovchinnikova S.V. *Konspekt flory Sibiri: Sosudistye rasteniya* [Siberian Flora: Vascular Plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 362 p.
 26. Kling A., Stankiewicz A., Wisłocka M., Polechońska L. Macro- and microelement distribution in organs of *Glyceria maxima* and biomonitoring applications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, pp. 4057–4065.
 27. Łojko R., Polechońska L., Klink A., Kosiba P. Trace metal concentrations and their transfer from sediment to leaves of four common aquatic macrophytes. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no. 19, pp. 15123–15131.
 28. Golubev S.V., Efremov A.A. A Study of the Mineral Composition and the Composition of Volatiles of Marsh Cinquefoil. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2013, vol. 39, no. 7, pp. 728–732.
 29. Kashchenko N.I., Chirikova N.K., Olennikov D.N. Agrimoniin, an active ellagitannin from *Comarum palustre* herb with anti- α -glucosidase and antidiabetic potential in streptozotocin-induced diabetic rats. *Molecule*, 2017, vol. 22, no. 1, article no. 73.
 30. Khan S., Ahmad I., Shah M.T., Rehman S., Khaliq A. Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90, pp. 3451–3457.
 31. Sidenko N.V., Khozhina E.I., Sherriff B.L. The cycling of Ni, Zn, Cu in the system «mine tailing-ground water-plants»: a case study. *Applied Geochemistry*, 2007, vol. 22, pp. 30–52.
 32. Arp C.D., Cooper D.J., Stednick J.D. The effects of acid rock drainage on *Carex aquatilis* leaf litter decomposition in rocky mountain fens. *Wetlands*, 1999, vol. 19, no. 3, pp. 665–674.
 33. Parshina E.K. *Destruktsiya rastitelnogo veshstva v bolotnykh ekosistemakh taezhnoy i lesotundrovoy zon Zapadnoy Sibiri*. Avtoreferat Kand. nauk [Destruction of Vegetation Substance in Wetland Ecosystems in Taiga and Forest-tundra in Western Siberia. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2009. 26 p.
 34. Konieczynski P., Wesolowski M. Total phosphorus and its extractable form in plant drugs. Interrelation with selected micro- and macroelements. *Food Chemistry*, 2007, vol. 103, pp. 210–216.
 35. Kashin V.K. Vitally Important Microelements in Transbaikalian Herbs. *Chemistry for Sustainable Development*, 2009, vol. 17, pp. 371–381.
 36. Kashin V.K. Conditionally Essential Microelements in the Medicinal Herbs of Transbaikalia. *Chemistry for Sustainable Development*, 2011, vol. 19, pp. 237–244.
 37. Leonova G.A., Anoshin G.N., Bychinskii V.A. Document Anthropogenic chemical transformation of aquatic ecosystems: Biogeochemical problems. *Geochemistry International*, 2005, vol. 43, no. 2, pp. 153–167.
 38. Moskovchenko D.V., Moisseeva I.N., Khosyainova N.V. Elemental composition of plants in Urengoy tundra. *Journal of ecology, forest and landscapes*, 2012, vol. 12, pp. 130–136. In Rus.
 39. Vardanyan L.G., Ingole B.S. Studies on heavy metal accumulation in aquatic macrophytes from Sevan (Armenia) and Carambolim (India) lake systems. *Environment International*, 2006, vol. 32, pp. 208–218.

40. Manasygov R.M., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Zinner N.S. Features of the elemental composition of plants of northern West Siberian palsas. *International Journal of Environmental Studies*, 2014, vol. 71, no. 5, pp. 678–684.
41. Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 53, pp. 53–70.
42. Pokrovsky O.S., Manasygov R.M., Loiko S., Shirokova L.S., Krivtsov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtsov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobiev S.N., Kirpotin S.N. Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in western Siberian rivers. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, no. 21, pp. 6301–6320.
43. Raudina T.V., Loiko S.V., Lim A.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Istigehev G.I., Kuzmina D.M., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. Dissolved organic carbon and major and trace elements in peat porewater of sporadic, discontinuous, and continuous permafrost zones of western Siberia. *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, no. 14, pp. 3561–3584.
44. Manasygov R.M., Vorobyev S.N., Loiko S.V., Krivtsov I.V., Shirokova L.S., Shevchenko V.P., Kirpotin S.N., Kulizhsky S.P., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Sinkin V.V., Pokrovsky O.S. Seasonal dynamics of organic carbon and metals in thermokarst lakes from the discontinuous permafrost zone of western Siberia. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, pp. 3009–3028.
45. Subbotina N.S., Dmitruk S.E., Babeshina L.G., Kelus N.V., Nikiforov L.A., Noskova G.N., Tartynova M.I. The heavy metals content of raw materials and extracts research. *Vestnik NGU. Seriya Biologiya, klinicheskaya meditsyna*, 2010, vol. 8, no. 3, pp. 92–97. In Rus.
46. Moskovchenko D.V. Biogeochemical features of bogs of Western Siberia. *Geography and Natural Resources*, 2006, vol. 1, pp. 63–70. In Rus.
47. Moskovchenko D.V., Valeeva V.I. Heavy metals in lichens cover in the north of Western Siberia. *Journal of ecology, forest and landscapes*, 2011, vol. 11, pp. 162–172. In Rus.
48. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Khozhina E.I. Distribution of radionuclides and trace elements in the lichen cover of West Siberian regions. *Geologiya i Geofizika*, 2005, vol. 46, no. 2, pp. 206–216.
49. Dauvalter V.A., Dauvalter M.V., Kashulin N.A., Sandimirov S.S. Chemical Composition of Bottom Sedimentary Deposits in Lakes in the Zone Impacted by Atmospheric Emissions from the Severonickel Plant. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 11, pp. 1148–1153.
50. Dickens A.F., Baldock J., Kenna T.C., Eglinton T.I. A depositional history of particulate organic carbon in a floodplain lake from the lower Ob' River, Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, pp. 4796–4815.
51. Fedotov A.P., Phedorin M.A., Enushchenko I.V., Vershinin K.E., Melgunov M.S., Khodzher T.V. A reconstruction of the thawing of the permafrost during the last 170 years on the Taimyr Peninsula (East Siberia, Russia). *Global and Planetary Change*, 2012, vol. 98–99, pp. 139–152.
52. Granina L.Z., Goldberg E.L., Panov V.S., Sushenzeva N.N., Sryvina Yu.V., Khodzher T.V. Organic components in bottom sediments from the lower Yenisei, the Gyda Bay, and the Kara Sea shelf. *Earth's Cryosphere*, 2011, vol. 15, no. 4, pp. 87–90.
53. Belyaev N.A., Peresykin V.I., Ponyaev M.S. The organic carbon in the water, the particulate matter, and the upper layer of the bottom sediments of the west Kara Sea. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 5, pp. 706–715.
54. Petrova V.I., Batova G.I., Kursheva A.V., Litvinenko I.V., Kononov D.A. Organic matter in the bottom sediments of the Ob Bay: Distribution, nature, and sources. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 140–151.
55. Savichev O.G., Kolesnichenko L.G., Saifulina E.V. The ecologo-geochemical state of water bodies in the Taz-Yenisei interfluvium. *Geography and Natural Resources*, 2011, vol. 32, no. 4, pp. 333–336.
56. Uvarova V.I. Hydrochemical description of the low Ob waterways. *Journal of ecology, forest and landscapes*, 2011, vol. 3, pp. 132–142. In Rus.
57. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N., Vosel' Y. The regularities of distribution of radionuclides and reare-earth elements in bottom sediments of Siberian lakes. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, pp. 1167–1178.
58. Loiko S.V., Pokrovsky O.S., Raudina T.V., Lim A., Kolesnichenko L.G., Shirokova L.S., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Abrupt permafrost collapse enhances organic carbon, CO₂, nutrient and metal release into surface waters. *Chemical Geology*, 2017, vol. 471, no. 5, pp. 153–165.
59. Wertebach T.-M., Knorr K.-H., Lordieck M., Tretiakov N., Blo dau C., Hölzel N., Kleinebecker T. Relationships between vegetation succession, pore water chemistry and CH₄ and CO₂ production in a transitional mire of Western Siberia (Tyumen Oblast). *Wetlands*, 2016, vol. 36, pp. 863–874.
60. Manasygov R.M., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Thermokarst lake waters across the permafrost zones of western Siberia. *The Cryosphere*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 1177–1193.
61. Shotyk W. The chronology of anthropogenic, atmospheric Pb deposition recorded by peat cores in three minerogenic peat deposits from Switzerland. *Science of the Total Environment*, 2002, vol. 292, pp. 19–31.
62. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 100–107.
63. Veretennikov A.V. *Fiziologiya rasteniy s osnovami biokhimii* [Physiology of plants with the fundamentals of biochemistry]. Voronezh, VGU Publ., 1987. 256 p.
64. Kabata-Pendias A., Krakowiak A. Useful phytoindicator (Dandelion) for trace metal pollution. 5th International conference proceedings: *Transport, fate and effects of silver in the environment*, Hamilton, Ontario, Canada, 1998. pp. 145–149.
65. Cicero-Fernández D., Peña-Fernández M., Expósito-Camargo J.A., Antizar-Ladislao B. Long-term (two annual cycles) phytoremediation of heavy metal-contaminated estuarine sediments by *Phragmites australis*. *New Biotechnology*, 2017, vol. 38, pp. 56–64.
66. Ramachandra T.V., Sudarshan P.B., Mahesh M.K., Vinay S. Spatial patterns of heavy metal accumulation in sediments and macrophytes of Bellandur wetland, Bangalore. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 206, pp. 1204–1210.
67. Barker A.V., Pilbeam D.J. *Handbook of Plant Nutrition*. Boca Raton, London, New York, Taylor & Francis Group, 2007. 613 p.
68. Vymazal J., Sveha J. Removal of alkali metals and their sequestration in plants in constructed wetlands treating municipal sewage. *Hydrobiologia*, 2012, vol. 692, no. 1, pp. 131–143.
69. Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p.
70. Hendriks I.E., Duarte C.M., Marbà N., Krause-Jensen D. pH gradients in the diffuse boundary layer of subarctic macrophytes. *Polar Biology*, 2017, vol. 40, no. 12, pp. 2343–2348.
71. Kabata-Pendias A. Soil-plant transfer of trace elements – an environmental issue. *Geoderma*, 2004, vol. 122, pp. 143–149.

Received: 1 March 2018.

Information about the authors

Rinat M. Manasyov, Cand. Sc., senior researcher, Tomsk State University; senior researcher, Federal Center for Integrated Arctic research.

Oleg S. Pokrovsky, Cand. Sc., head of laboratory, Tomsk State University; leading researcher, Federal Center for Integrated Arctic research; leading researcher, GET UMR 5563 CNRS University of Toulouse.

Lyuidmila S. Shirokova, Cand. Sc., leading researcher, Federal Center for Integrated Arctic research; senior researcher, GET UMR 5563 CNRS University of Toulouse.

Sergey N. Kirpotin, Dr. Sc., professor, Tomsk State University.

Nadezhda S. Zinner, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University.