

Р.М. Манасыпов<sup>1,2</sup>, С.Н. Кирпотин<sup>1</sup>, О.С. Покровский<sup>3,4</sup>, Л.С. Широкова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский Государственный Университет (г. Томск)

<sup>2</sup>Университет Поля Сабатье (г. Тулуза, Франция)

<sup>3</sup>Национальный центр научных исследований Франции (г. Тулуза, Франция)

<sup>4</sup>Институт экологических проблем Севера УрО РАН, (г. Архангельск)

Работа выполнена при поддержке CAR-WET-SIB “Biogeochemical cycle of carbon in wetlands of Western Siberia” GDRI (Groupement de recherche international) project, ANR “Arctic Metals”, гранта РФФИ 08-04-92495-CNRS\_a, РФФИ моб\_ст 11-05-90726, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» Государственный контракт № 14.740.11.0935, программы INTERACT (grant agreement No262693) under the European Community's Seventh Framework Programme

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОЗЕРНЫХ ВОД И МАКРОФИТОВ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ЭКОСИСТЕМ СУБАРКТИКИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Рассмотрено современное состояние озерно-болотных экосистем севера Западной Сибири, механизмы их образования и сукцессии. С помощью ICP-MS проанализирован элементный химический состав озерных вод и макрофитов четырех наиболее характерных озерных экосистем субарктики Западной Сибири. В качестве модельного биогеохимического объекта опробования выбран вид *Menyanthes trifoliata* L. – Вахта трехлистная. Выявлена общая динамика содержания химических элементов в Вахте трехлистной во всех четырех экосистемах. Показано, что минимальными концентрациями в растениях всех экосистем характеризуются редкоземельные элементы, малоподвижные в пресных водах и биологически недоступные растениям, а также трех- и четырехвалентные гидролизаты. В ходе работы были посчитаны коэффициенты биологического накопления химических элементов в Вахте трехлистной относительно воды (Кб) для каждой из четырех стадий развития озерных экосистем. Выявлено, что в траве Вахты трехлистной сильно накапливаются некоторые тяжелые металлы, такие как, Pb, Zn, Sr, Co и другие, источниками которых могут служить глобальные факторы (атмосферный перенос, водный режим и др.), так и различного рода локальные загрязнения, происходящие в результате антропогенной нагрузки на экосистемы севера.

**Ключевые слова:** Термокарстовые экосистемы субарктики Западной Сибири; элементный состав; озерные воды; *Menyanthes trifoliata* L.; коэффициент биологического накопления.

### Введение

С возрастанием антропогенного влияния на природную среду, локальное загрязнение в ходе хозяйственной деятельности человека и глобальное загрязнение через дальний атмосферный перенос, вопрос о накоплении микроэлементов во всех звеньях водных экосистем приобретает все большее значение [1]. Термокарстовые озера как объекты гидрохимического и биогеохимического исследования слабо изучены для севера Западной Сибири, имеются лишь фрагментарные данные по гидрохимическому составу озерных вод и биогеохимическим процессам, протекающим в термокарстовых озерах [2–5].

Перенос веществ в водной среде является одним из важнейших процессов, обеспечивающих круговорот веществ, стабильность биогеохимических циклов. Особенности ландшафтно-геохимической структуры лесоболотной зоны Западно-Сибирской равнины оказывают большое влияние на состав поверхностных вод, которые очень ярко отражают специфику природной среды этого региона [6].

Озерно-болотные экосистемы субарктики Западной Сибири являются уникальными природными индикаторами климатических изменений, будучи наиболее чувствительны к изменениям климата в виду их пограничного положения в пределах криолитозоны [7, 8]. До недавнего времени ландшафт мерзлых бугристых болот находился в достаточно стабильном состоянии. Наблюдалась своеобразная «пульсация» поверхности, обусловленная взаимными переходами элементов ландшафта. Общая схема этого процесса может выглядеть следующим образом: просадка участка плоскобугристого болота с образованием мочажины – «эмбрионического» озера, затем озеро начинает расти и, достигнув определенного размера, сбрасывает свои воды в другой водоем, образуется хасырей (спущенное озеро), в хасырее происходит мерзлотное пучение, что приводит к образованию мерзлых бугров – началу цикла развития термокарстовых озер (Рисунок 1). Этот процесс хорошо дешифрируется на космических снимках за многолетний цикл наблюдений, их анализ позволяет говорить, что в настоящее время на севере Западной Сибири происходят процессы деградации многолетней мерзлоты и увеличения количества термокарстовых озер [7].

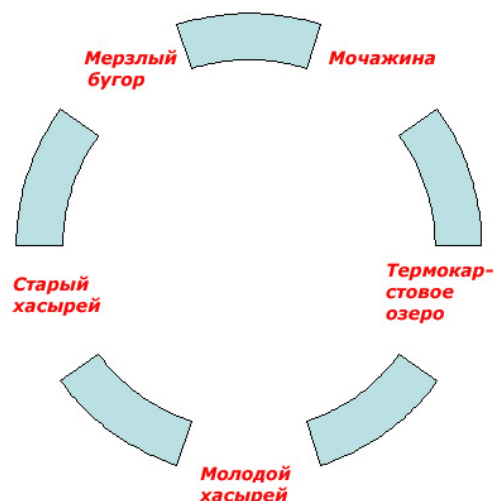


Рисунок 1 – Схема циклической сукцессии развития плоскобугристых болот: По [7]

### Материалы и методы исследования

Изученные нами водные объекты представляют собой термокарстовые озера с берегами сложенными торфяными сфагновыми мхами, донные отложения представлены торфяным детритом. Термокарст развивается за счет вытаивания сингенетических и эпигенетических сегрегационных льдов, растущих и погребённых повторно-жильных и пластовых льдов. В результате образуются озёра, западины и другие отрицательные формы рельефа, разделённые обычно плоскобугристыми торфяниками высотой 2–4 м. Наиболее крупные термокарстовые озёра, возникающие в торфяниках, имеют размеры до нескольких км [9]. Вода озёр богата гуминовыми веществами, за счет этого она окрашена в темные цвета. Все термокарстовые озера данного района относят к ультрапресным с преимущественно атмосферным питанием; температура воды в мелкокотловинных озерах мало отличается от температуры воздуха [10].

Диаметр водного зеркала озёр определялся на месте с помощью GPS-навигатора. Отбор проб проводился в Надым-Пурском междуречье, в окрестностях п. Пангоды (Ямало-Ненецкий автономный округ) (Рисунок 2) в 2010 году, было обследовано 4 наиболее характерных озерных экосистемы разных стадий развития (Таблица 1).

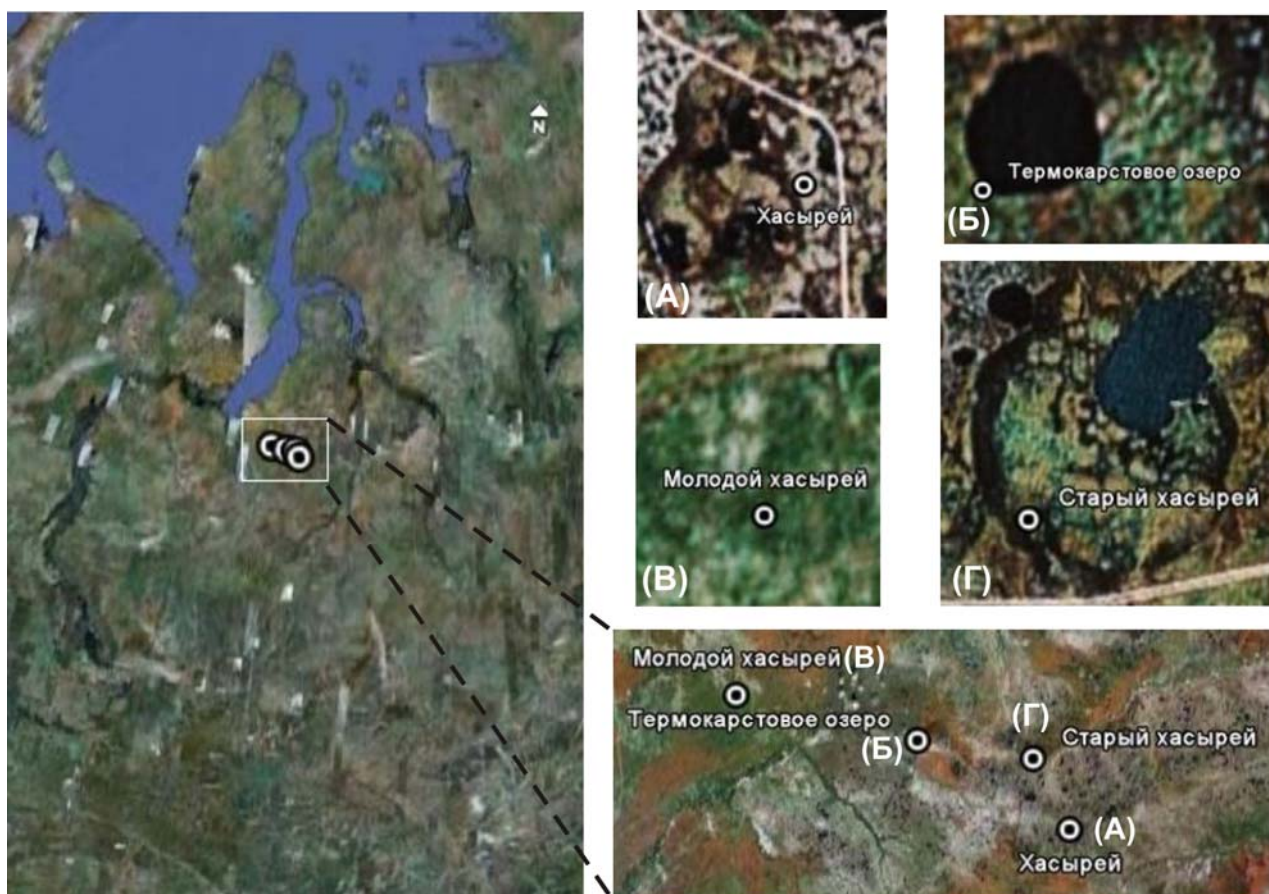


Рисунок 2 – Карта района исследований (Надым-Пурское междуречье), показывающая четыре изученных озерных экосистемы. Изображение из GoogleEarth.

Таблица 1

Данные измерений физических и гидрохимических параметров опробованных термокарстовых озер

Стадия развития	Координаты	pH	ЭП мкС/см	РОУ, мг/л	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	Cl <sup>-</sup> , мг/л	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л
Термокарстовое озеро	65°52'10,5"/ 074°52'46,4"	4,43	10,9	9,34	0,00012	0,1	0,42
Молодой хасырей	65°54'09,9"/ 074°08'57,2"	4,54	12,2	16,94	0,00014	0,03	0,13
Хасырей	65°45'31,8"/ 075°30'51,4"	4,89	7,3	7,9	0,00015	0,03	0,18
Старый хасырей	65°51'51,5"/ 075°20'19,1"	5,05	11,4	17,27	0,00014	0,09	0,05

Примечание: Анализы выполнены в лаборатории Геологические науки в окружающей среде (GET, Тулуза, Франция); ЭП – электропроводность; РОУ – растворенный органический углерод

Пробы озерных вод отбирались на литорали озер в зарослях макрофитов с поверхности (30–35 см) в химически чистые полипропиленовые стаканы объемом 250 мл, затем воду фильтровали на месте или в течение 4 часов после отбора через мембранные фильтры (MILLEX Filter Unit) с диаметром пор 0,45 мкм с использованием стерильных шприцов.

Образец фильтрованной озерной воды делился на два полипропиленовых флакона, предварительно вымытых в чистой комнате, одну пробу подкисляли добавлением 2 % HNO<sub>3</sub> (0,01 мг), вторую не подкисляли. До проведения анализа пробы хранили в холодильнике.

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.

Не консервированную пробу делили на следующие виды анализов: определение кремния с молибдатом аммония на автоанализаторе AutoAnalyzer 3. Bran+luebbe; определение содержания органического углерода методом полного сжигания растворенного органического углерода при 800 С° на платиновом катализаторе с дальнейшим определением CO<sub>2</sub> методом инфракрасной спектроскопии, на приборе TOC-VCSN, SHIMADZU0, предел обнаружения 1-100 мг/л; погрешности 2-3 %; определение хлоридов и сульфатов проводилось методом

жидкостной хроматографии высокого разрешения в интервале 0,05–10 мг/л, на приборе DIONEX ICS-2000.

Как известно, наиболее активными компонентами круговорота фитомассы и биогенных элементов в болотных сообществах являются зеленые ассимилирующие органы растений – надземная часть, листья, хвоя [11].

В качестве модельного биогеохимического объекта опробования выбран вид *Menyanthes trifoliata* L. – Вахта трехлистная (Рисунок 3), являющийся типично пресноводным (условно-пресноводным) **олиготрофным гидрогигрофитом**, встречающимся во всех флористических провинциях Сибири [12, 13]. Вахта трехлистная наиболее активно по сравнению с другими травянистыми растениями участвует в биогеохимических процессах озерно-болотных экосистем данной территории. При разложении ветоши и корней вахты в течение года теряется до 97 % макроэлементов [14].



Рисунок 3 - Вахта трехлистная в лесотундровой зоне Западной Сибири

После отбора, водные растения тщательно промывались водой и помещались в осмотические пакеты фирмы Osmofilm для высушивания до воздушно-сухого состояния и избегания различного рода загрязнений.

Подготовку проб к анализу проводили методом кислотного разложения смесью азотной, плавиковой и хлорной кислот, в стаканах из фторопласта. Перед разложением высушенные растения растирались в агатовой ступке и доводили до постоянного веса при температуре 105 °С в течение 5 часов.

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.

### Результаты исследования и обсуждение

Термокарстовые озера данной территории характеризуются низкими значениями рН, но как видно из Таблицы 1, этот показатель растет в процессе развития озерных экосистем. Ранее нами было показано [4, 15], что на всех этапах развития термокарстовых озер субарктики Западной Сибири показатель растворенного органического углерода уменьшается, т.к. доминирующей формой растворенного органического вещества являются аллохтонные фульвокислоты и гуминовые кислоты, поступающие в воду при выщелачивании из торфяной почвы [4].

Нами установлена тенденция увеличения показателя РОУ в конечной стадии развития озер, возможно, это связано со степенью зарастания макрофитами литорали озер и образованием автохтонного органического вещества, вследствие чего, происходит увеличение содержания РОУ в озерных водах.

Полученные в результате анализов данные по составу вод термокарстовых озер и макрофитов позволяют говорить о динамике содержания ряда химических элементов (Таблица 2).

Таблица 2

Элементный состав озерных вод и Вахты трехлистной в четырех озерно-болотных экосистемах севера Западной Сибири

Хим. элементы	Озерные воды, мкг/л				Кларк речной воды [16], мкг/л	Вахта трехлистная, мкг/кг сухой массы			
	Молодой хасырей	Озеро	Старый хасырей	Хасырей		Молодой хасырей	Озеро	Старый хасырей	Хасырей
B	1,6	2,2	2,9	2	20	4,4	7	10,1	6,3
Na	204,4	269	246,3	186,3	5000	1217	893,2	2694	2712
Mg	283,6	196,3	509,3	322	2900	852,2	1286	2147	1854
Al	166,6	90,2	100,5	47	160	119,2	45,4	33,8	51,7
K	11,5	63,9	119,3	28,9	2000	2289	6558	5407	3842
Ca	489,6	423,6	687,9	420,7	12000	851,1	1651	2905	1868
V	0,2	0,45	0,15	0,16	1	0,26	0,095	0,09	0,18
Cr	2,8	4,04	3,6	4,1	1	0,17	0,055	0,044	0,08
Mn	17,2	14,7	31,6	6,2	10	41,1	66,2	315,4	91,7
Fe	742,1	136,3	200,6	151,7	40	954,8	304	185,5	1278
Co	0,69	0,38	0,49	0,16	0,3	0,74	0,62	0,96	1,4
Ni	2,5	2,8	3,1	2,8	2,5	1,4	1,5	2,1	2,2
Zn	20,5	9,4	9,7	7,2	20	37,1	32,9	30	34
As	0,87	0,41	0,53	0,48	2	0,27	0,073	0,083	0,36
Rb	0,055	0,2	0,28	0,096	2	9,6	17,9	24,4	17,4
Sr	4,9	4,2	4,7	3,4	50	9,9	17,1	25,4	18,2
Y	0,094	0,046	0,14	0,039	0,7	0,058	0,02	0,028	0,06
Zr	0,3	0,13	0,26	0,11	2,6	0,26	0,035	0,06	0,048
Mo	0,057	0,097	0,061	0,065	1	0,021	0,036	0,03	0,022
Sb	0,048	0,056	0,044	0,041	1	0,006	0,02	0,004	0,009
Cs	0,012	0,019	0,012	0,011	0,03	0,017	0,026	0,05	0,046
Ba	5,8	4,3	2,5	1,7	30	15,8	26,8	19,2	16,9
La	0,065	0,037	0,11	0,029	0,05	0,12	0,067	0,077	0,11
Ce	0,19	0,092	0,3	0,074	0,08	0,16	0,049	0,063	0,14
Pr	0,024	0,011	0,037	0,011	0,007	0,017	0,004	0,007	0,015
Sm	0,022	0,015	0,032	0,011	0,008	0,01	0,004	0,004	0,011
Eu	0,013	0,011	0,013	0,007	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003

Gd	0,029	0,018	0,041	0,016	0,008	0,011	0,003	0,004	0,009
Tb	0,003	0,004	0,004	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
Dy	0,018	0,011	0,025	0,008	0,005	0,009	0,003	0,004	0,009
Ho	0,005	0,005	0,006	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002
Er	0,012	0,014	0,017	0,006	0,004	0,006	0,002	0,002	0,005
Yb	0,012	0,008	0,016	0,006	0,004	0,007	0,002	0,002	0,004
Hf	0,032	0,026	0,03	0,025	-	0,012	0,002	0,001	0,001
Pb	0,17	0,076	0,059	0,063	1	5,1	1	0,54	0,98
Th	0,024	0,009	0,021	0,007	0,1	0,027	0,004	0,005	0,012
U	0,004	0,004	0,005	0,004	0,5	0,005	0,001	0,001	0,002

Примечание: Элементный состав проб определяли на квадрупольном ICP-MS (Agilent Technologies, 7500 ce) с добавлением внутреннего стандарта In + Re. Анализы выполнены в лаборатории Геологические науки в окружающей среде (GET, Тулуза, Франция); «-» - отсутствие данных.

Изменения содержания химических элементов в водных растениях на примере Вахты трехлистной в общем виде может быть представлено в виде графика (Рисунок 4)

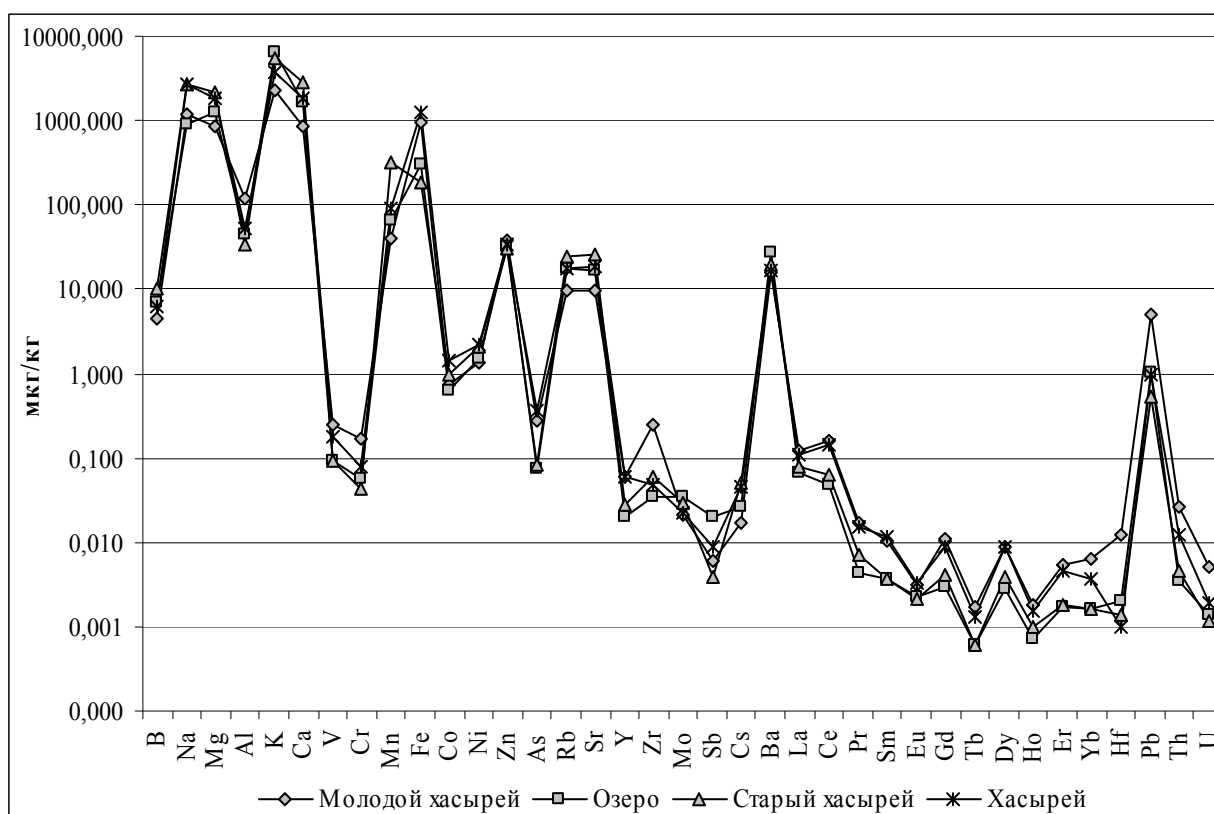


Рисунок 4 – Содержания химических элементов в траве Вахты трехлистной четырех озерных экосистем разных стадий развития, мкг/кг сухой массы

По усредненному содержанию химические элементы в траве Вахты трехлистной, произрастающей в экосистемах разных стадий развития, располагаются в следующем порядке:

Для термокарстового озера –  $K > Ca > Mg > Na > Fe > Mn > Al > Zn > Ba > Rb > Sr > B > Ni > Pb > Co > V > As > La > Cr > Ce > Mo > Zr > Cs > Y > Th > Dy > Yb > Hf > U$

Для молодого хасырея –  $K > Na > Fe > Mg > Ca > Al > Mn > Zn > Ba > Sr > Rb > Pb > B > Ni > Co > As > V > Zr > Cr > Ce > La > Y > Th > Mo > Cs > Hf > Dy > Yb > U$

Для хасырея –  $K > Na > Ca > Mg > Fe > Mn > Al > Zn > Sr > Rb > Ba > B > Ni > Co > Pb > As > V > Ce > La > Cr > Y > Zr > Cs > Mo > Th > Dy > Yb > U > Hf$

Для старого хасырея –  $K > Ca > Na > Mg > Mn > Fe > Al > Zn > Sr > Rb > Ba > B > Ni > Co > Pb > V > As > La > Ce > Zr > Cs > Cr > Mo > Y > Th > Sb > Dy > Yb > Hf > U$

Из Рисунок 4 видно, что общая динамика содержания химических элементов в Вахте трехлистной во всех четырех экосистемах одинакова. Однако имеются некоторые различия, так в Вахте произрастающей на литорали термокарстового озера наиболее, по сравнению с другими экосистемами, содержатся такие элементы как: K, Sb, Pb и Ba. Вахта произрастающая в старом хасырее наиболее богата такими макроэлементами как Mg и Ca и микроэлементами Mn, Co, Rb, Sr, Cs. Минимальными концентрациями в растениях всех экосистем характеризуются редкоземельные элементы, малоподвижные в пресных водах и биологически недоступные растениям, а также трех- и четырехвалентные гидролизаты.

В ходе работы были посчитаны коэффициенты биологического накопления химических элементов в Вахте трехлистной относительно воды (Кб) для каждой из четырех стадий развития озерных экосистем (Рисунок 5).

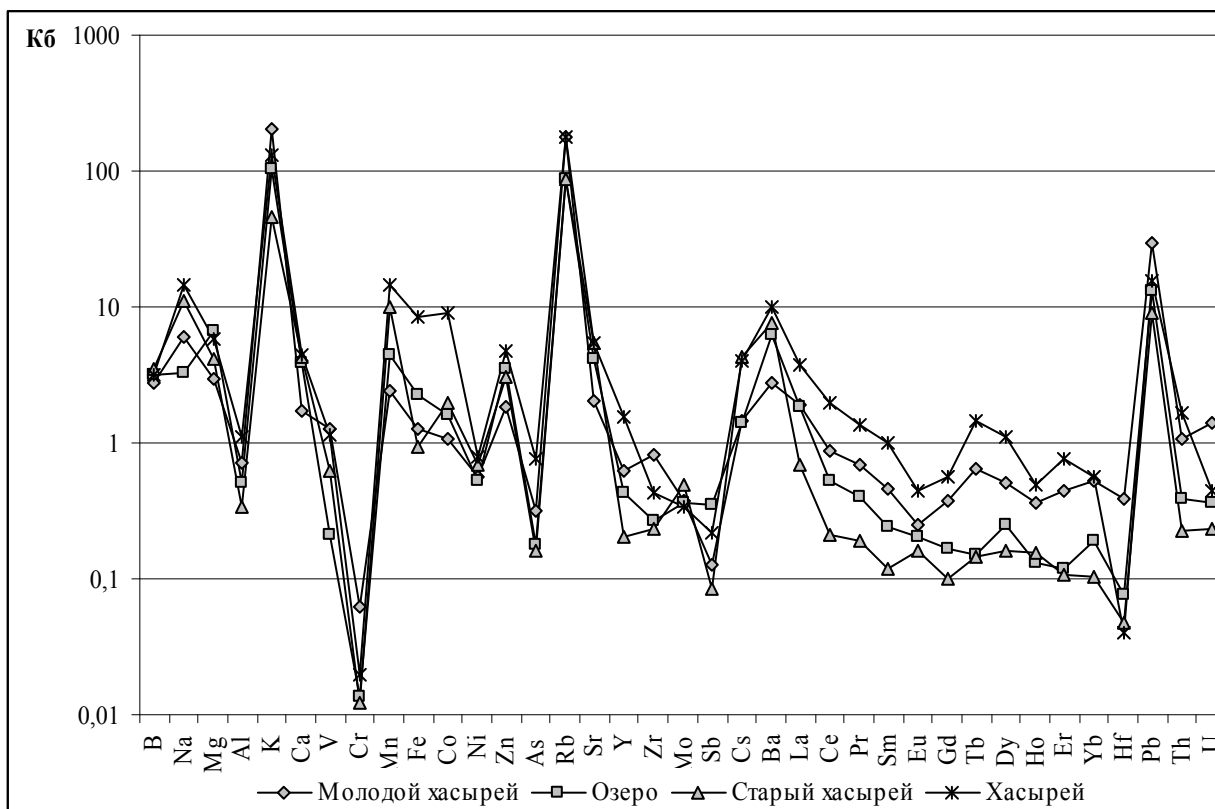


Рисунок 5 – Значения Коэффициента биологического накопления (Кб) химических элементов в Вахте трехлистной относительно воды термокарстовых озер четырех озерных экосистем разных стадий развития

По величине Кб можно составить ряды химических элементов для Вахты трехлистной произрастающей в четырех озерных экосистемах:

Озеро – К > Rb > Pb > Mg > Ba > Mn > Sr > Ca > Zn > Na > B > Fe > La > Co > Cs > Ce > Ni > Al > Y > Th > Mo > U > Zr > Dy > V > Yb > As > Hf > Cr

Молодой хасырей – К > Rb > Pb > Na > Mg > B > Ba > Mn > Sr > La > Zn > Ca > Cs > U > Fe > V > Th > Co > Ce > Zr > Al > Y > Ni > Yb > Dy > Hf > Mo > As > Cr

Хасырей – Rb > K > Pb > Mn > Na > Ba > Co > Fe > Mg > Sr > Zn > Ca > Cs > La > B > Ce > Th > Y > V > Dy > Al > Ni > As > Yb > U > Zr > Mo > Hf > Cr

Старый хасырей – Rb > K > Na > Mn > Pb > Ba > Sr > Cs > Ca > Mg > B > Zn > Co > Fe > La > Ni > V > Mo > Al > U > Zr > Th > Ce > Y > As > Dy > Yb > Hf > Cr

Высокими значениями Кб для Вахты, произрастающей во всех изученных экосистемах характеризуются макроэлементы необходимые растениям в процессе жизнедеятельности (К, Mg, Na) значения Кб для которых меняется в зависимости от стадии развития. Так, в ходе развития озерных экосистем, уменьшается значение Кб для Mg, но увеличивается роль Na.

Активно накапливаются Вахтой трехлистной такие микроэлементы как Rb, Sr, Ba, Pb, что вероятно говорит о специфичности их накопления, а также о возможном загрязнении водоемов. Активное накопление рубидия, наравне с калием, объясняется их физиологической схожестью, т.к. рубидий может отчасти замещать позиции калий в соединениях, хотя высокие его концентрации довольно токсичны для растений [17].

Mn активно накапливается в растениях произрастающих в экосистемах конечных стадий развития (Хасырей и Старый хасырей), что может быть связано с изменениями гидрологического режима местообитаний. Также ранее многими исследователями отмечалось [18, 19], что Mn обладает высокой биогеохимической активностью в тундровых и таежных ландшафтах. Дополнительным фактором повышенной концентрации Mn в макрофитах конечных стадий может являться повышенный pH воды и более интенсивное протекание фотосинтеза, приводящее к окислению  $Mn^{2+}$  до  $Mn^{4+}$  на поверхности клеток.

Данные по ряду элементов (высокое содержание Mn, Pb и низкое содержание Cr) полученные нами в ходе работ согласуются с ранее опубликованными работами [19, 20]. Также высокие содержания Mn, Fe и Pb отмечено для торфа верховых болот севера Западной Сибири [20], и для кустистых лишайников данной территории [21, 22].

## Выводы

1. Термокарстовые озера субарктики Западной Сибири представляют собой мелкокотловинные озера с темным цветом воды, торфяным дном. Они являются стадиями перехода элементов ландшафта от



плоскобугристого болота до хасырея (спущенное озеро), в котором, в последствие происходит промерзание грунта и мерзлотное пучение с возобновлением плоскобугристого болота.

2. Во всех исследованных озерных водах складывается благоприятная обстановка для накопления ряда химических элементов (Fe, Cr, Mn, Co, Ni, редкоземельные элементы) до уровня существенно превышающего кларк речной воды [16].

3. Общая динамика содержания химических элементов в Вахте трехлистной во всех четырех экосистемах одинакова. Но имеются некоторые различия, так в Вахте, произрастающей на литорали термокарстового озера, по сравнению с другими экосистемами, наиболее накапливаются такие элементы как: K, Sb, Pb и Ba. Вахта, произрастающая в старом хасырее наиболее богата такими макроэлементами как Mg и Ca и микроэлементами Co, Rb, Sr, Cs, Mn.

4. Наибольшим Коэффициентом накопления (Кб) характеризуются макроэлементы, а также некоторые микроэлементы такие как Rb, Mn и другие, что объясняется спецификой биогеохимической обстановки данной территории. В траве Вахты трехлистной сильно накапливаются некоторые тяжелые металлы, такие как, Pb, Zn, Sr, Co и другие, источниками которых могут служить глобальные факторы (атмосферный перенос, водный режим и др.), так и различного рода локальные загрязнения происходящие в результате антропогенной нагрузки на экосистемы севера Западной Сибири (нефтяные «качалки», «лисьи хвосты» сжигаемого газа и др.) [23].

### Литература

1. Куликова Н.Н., Парадина Л.Ф., Сутурин А.Н., Таничева И.В., Ижболина Л.А., Ханаева И.В., Тимошкин О.А. Микроэлементный состав круглогодично вегетирующих макроводорослей каменистой литорали оз. Байкал (Россия) // Альгология. 2008. Т. 18, № 3. С. 244–255.

2. Леонова Г.А. Биогеохимическая индикация загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 2. С. 215–222.

3. Леонова Г.А., Аношин Г.Н., Бычинский В.А. Биогеохимические проблемы антропогенной химической трансформации водных экосистем // Геохимия. 2005. № 2. С. 182–196.

4. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., and Dupre B. Effect of permafrost thawing on organic carbon and trace element colloidal speciation in the thermokarst lakes of western Siberia // Biogeosciences. 2011. № 8. P. 565–583.

5. 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 / S. Audry, O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, B. Dupre // Biogeosciences Discuss. 2011. № 8. P. 8845–8894. doi:10.5194/bgd-8-8845-2011.

6. Московченко Д.В. Геохимия ландшафтов севера Западно-Сибирской равнины: структурно-функциональная организация вещества геосистем и проблемы экодиагностики : автореф. дис. ... д-ра. геогр. наук. Санкт-Петербург, 2010. 33 с.

7. Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 133. С. 185–189.

8. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера земли. 2009. Т. XIII, № 2. С. 16–26.

9. Козлов С.А. Оценка устойчивости геологической среды на морских месторождениях углеводородов в Арктике // Нефтегазовое дело. 2005. № 2. С. 15–24.

10. Орехов П.Т. Аквальные природные комплексы северной тайги Западной Сибири // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV, № 2. С. 23–28.

11. Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск : Наука, 1986. 192 с.

12. 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.

13. Конспект флоры Сибири: Сосудистые растения / Сост. Л.И. Малышев, Г.А. Пешкова, К.С. Байков и др. Новосибирск : Наука, 2005. 362 с.

14. Паршина Е.К. Деструкция растительного вещества в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2009. 24 с.

15. Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N. and Dupre B. Heterotrophic bacterio-plankton in thawed lakes of the northern part of Western Siberia controls the CO<sub>2</sub> flux to the atmosphere // Internat. J. Environ. Stud. 2009. № 66. P. 433–445.

16. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Под. ред. А.П. Соловова. М. : Недра, 1990. 335 с.

17. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М. : Мир, 1989. 439 с.

18. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М. : Высш. шк., 1988. 328 с.

19. *Московченко Д.В., Моисеева И.Н., Хозяинова Н.В.* Элементный состав растений Уренгойских тундр // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2012. № 12. С. 130–136.
20. *Московченко Д.В.* Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63–70.
21. *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.
22. *Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Хожина Е.Н.* Распределение радионуклидов и микроэлементов в лишайниковом покрове различных регионов Западной Сибири // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 2. С. 206–216.
23. *Леонова Г.А., Аношин Г.Н., Андросова Н.В., Бадмаева Ж.О., Ильина В.Н.* Экологическая экспертиза состояния озер Ямало-Ненецкого автономного округа методом биогеохимической индикации // Экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики: Тезисы докладов международной конференции. Томск, 2001. С. 153.