

УДК 550.47
doi: 10.17223/19988591/19/15

**Р.М. Манасыпов^{1,2}, С.Н. Кирпотин¹, О.С. Покровский^{3,4},
Л.С. Широкова⁴**

¹Биологический институт Томского государственного университета (г. Томск)

²Университет Поля Сабатье (г. Тулуза, Франция)

³Национальный центр научных исследований Франции (г. Тулуза, Франция)

⁴Институт экологических проблем Севера УроРАН (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» (ГК № 14.740.11.0935), программы INTERACT (grant agreement No 262693) 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. Выявлена общая динамика содержания химических элементов в данном растении 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 как глобальные факторы (атмосферный перенос, водный режим и др.), так и различного рода локальные загрязнения, происходящие в результате антропогенной нагрузки на экосистемы севера Западной Сибири.*

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, локального загрязнения в ходе хозяйственной деятельности человека и глобального загрязнения 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].

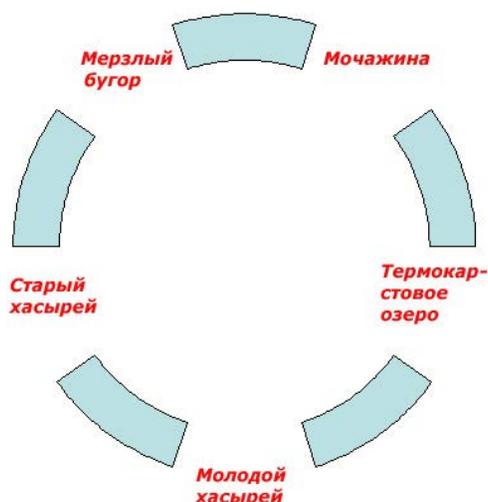


Рис. 1. Схема циклической сукцессии развития плоскобугристых болот (по [7])

Озерно-болотные экосистемы субарктики Западной Сибири являются уникальными природными индикаторами климатических изменений будучи наиболее чувствительными к изменениям климата ввиду 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 озера (рис. 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].

На сегодняшний день районы Западной Сибири с развитием многолетней мерзлоты активно осваиваются и являются предметом всестороннего изучения, что обуславливает актуальность биогеохимических исследований данного региона. Целью данной работы явилось изучение особенностей элементного состава озерных вод и макрофитов термокарстовых экосистем субарктики Западной Сибири в контексте естественной сукцессии ландшафта и современных климатических изменений.

Материалы и методики 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 погребенных повторно-жильных и пластовых льдов. В результате образуются озера, западины и другие отрицательные формы рельефа, разделенные обычно плоскобугристыми торфяниками высотой 2–4 м. Наиболее крупные термокарстовые озера, возникающие в торфяниках, имеют размеры до нескольких километров [9]. Вода озер богата гуминовыми веществами, которые придают ей темную окраску. 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 озер определялся на месте с помощью GPS-навигатора. Отбор проб проводился в Надым-Пурском междуречье, в окрестностях п. Пангоды (Ямало-Ненецкий автономный округ) (рис. 2) в 2010 г., было обследовано 4 наиболее характерных озерных экосистемы разных стадий развития (табл. 1).

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 ч после отбора через мембранные фильтры MILLEX Filter Unit (Millipore, США) 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_3 (0,01 мг) (анализ элементного состава), вторую не подкисляли. До проведения анализа пробы хранили в холодильнике.

Неконсервированную пробу делили на следующие виды анализов: определение кремния с молибдатом аммония на автоанализаторе AutoAnalyzer 3 (Bran+Luebbe, Германия); определение содержания органического углеро-

да методом полного сжигания растворенного органического углерода при 800°C на платиновом катализаторе с дальнейшим определением CO₂ методом инфракрасной спектроскопии на приборе TOC-VCSN (SHIMADZU, Япония), 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 (DIONEX, США).

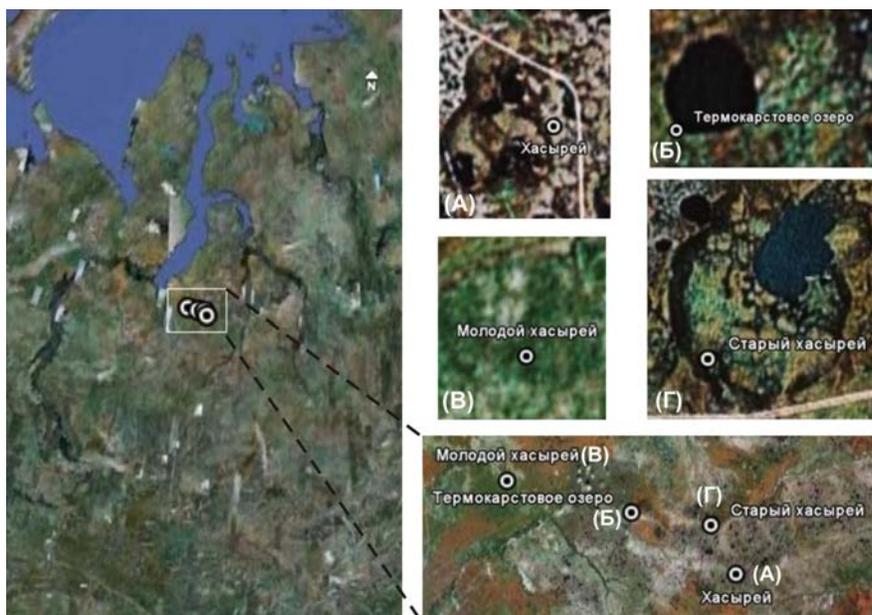


Рис. 2. Карта района исследований (Надым-Пурское междуречье) с четырьмя изученными озерными экосистемами (изображение из «GoogleEarth»)

Таблица 1

Данные измерений физических и гидрохимических параметров опробованных термокарстовых озер

| Стадия развития | Координаты | pH | ЭП, мкС/ см | РОУ, мг/л | HCO ₃ ⁻ , мг/л | Cl ⁻ , мг/л | SO ₄ ²⁻ , мг/л |
|----------------------|------------------------------|------|-------------------|--------------|---|---------------------------|---|
| Термокарстовое озеро | 65°52'10,5"/ 074°52'46,4" | 4,43 | 10,90 | 9,34 | 0,00012 | 0,10 | 0,42 |
| Молодой хасырей | 65°54'09,9"/ 074°08'57,2" | 4,54 | 12,20 | 16,94 | 0,00014 | 0,03 | 0,13 |
| Хасырей | 65°45'31,8"/ 075°30'51,4" | 4,89 | 7,30 | 7,90 | 0,00015 | 0,03 | 0,18 |
| Старый хасырей | 65°51'51,5"/ 075°20'19,1" | 5,05 | 11,40 | 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.

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 (рис. 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].



Рис. 3. Вахта трехлистная в лесотундровой зоне Западной Сибири

После отбора водные растения тщательно промывались водой и помещались в осмотические пакеты фирмы Osmofilm (Франция) для высушивания до воздушно-сухого состояния, избегая 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 растирали в агатовой ступке и доводили до постоянного веса при температуре 105°C в течение 5 ч.

Элементный состав макрофитов и подкисленных проб воды определяли на квадрупольном ICP-MS Agilent 7500 se (Agilent Technologies, США) 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 pH, однако, как видно из табл. 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, так как 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 POУ в конечной стадии развития озер, возможно, это связано со степенью зарастания макрофитами литорали озер и образованием автохтонного органического вещества, вследствие чего происходит увеличение содержания POУ в озерных водах.

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

Изменения содержания химических элементов в водных растениях на примере вахты трехлистной в общем виде представлено на рис. 4.

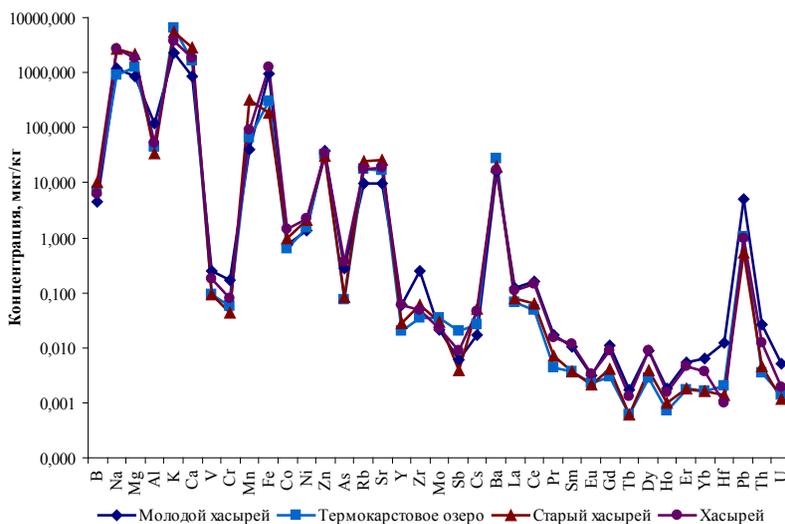


Рис. 4. Содержание химических элементов в траве вахты трехлистной четырех озерных экосистем разных стадий развития

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

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

Т а б л и ц а 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 | Термокар-стовое озеро | Старый хасырей | Хасырей | | Молодой хасырей | Термокар-стовое озеро | Старый хасырей | Хасырей |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| B | 1,600 | 2,200 | 2,900 | 2,000 | 20,000 | 4,400 | 7,000 | 10,100 | 6,300 |
| Na | 204,400 | 269,000 | 246,300 | 186,300 | 5000,000 | 1217,000 | 893,200 | 2694,000 | 2712,000 |
| Mg | 283,600 | 196,300 | 509,300 | 322,000 | 2900,000 | 852,200 | 1286,000 | 2147,000 | 1854,000 |
| Al | 166,600 | 90,200 | 100,500 | 47,000 | 160,000 | 119,200 | 45,400 | 33,800 | 51,700 |
| K | 11,500 | 63,900 | 119,300 | 28,900 | 2000,000 | 2289,000 | 6558,000 | 5407,000 | 3842,000 |
| Ca | 489,600 | 423,600 | 687,900 | 420,700 | 12000,000 | 851,100 | 1651,000 | 2905,000 | 1868,000 |
| V | 0,200 | 0,450 | 0,150 | 0,160 | 1,000 | 0,260 | 0,095 | 0,090 | 0,180 |
| Cr | 2,800 | 4,040 | 3,600 | 4,100 | 1,000 | 0,170 | 0,055 | 0,044 | 0,080 |
| Mn | 17,200 | 14,700 | 31,600 | 6,200 | 10,000 | 41,100 | 66,200 | 315,400 | 91,700 |
| Fe | 742,100 | 136,300 | 200,600 | 151,700 | 40,000 | 954,800 | 304,000 | 185,500 | 1278 |
| Co | 0,690 | 0,380 | 0,490 | 0,160 | 0,300 | 0,740 | 0,620 | 0,960 | 1,400 |
| Ni | 2,500 | 2,800 | 3,100 | 2,800 | 2,500 | 1,400 | 1,500 | 2,100 | 2,200 |
| Zn | 20,500 | 9,400 | 9,700 | 7,200 | 20,000 | 37,100 | 32,900 | 30,000 | 34,000 |
| As | 0,870 | 0,410 | 0,530 | 0,480 | 2,000 | 0,270 | 0,073 | 0,083 | 0,360 |
| Rb | 0,055 | 0,200 | 0,280 | 0,096 | 2,000 | 9,600 | 17,900 | 24,400 | 17,400 |
| Sr | 4,900 | 4,200 | 4,700 | 3,400 | 50,000 | 9,900 | 17,100 | 25,400 | 18,200 |
| Y | 0,094 | 0,046 | 0,140 | 0,039 | 0,700 | 0,058 | 0,020 | 0,028 | 0,060 |
| Zr | 0,300 | 0,130 | 0,260 | 0,110 | 2,600 | 0,260 | 0,035 | 0,060 | 0,048 |

Окончание табл. 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mo | 0,057 | 0,097 | 0,061 | 0,065 | 1,000 | 0,021 | 0,036 | 0,030 | 0,022 |
| Sb | 0,048 | 0,056 | 0,044 | 0,041 | 1,000 | 0,006 | 0,020 | 0,004 | 0,009 |
| Cs | 0,012 | 0,019 | 0,012 | 0,011 | 0,030 | 0,017 | 0,026 | 0,050 | 0,046 |
| Ba | 5,800 | 4,300 | 2,500 | 1,700 | 30,000 | 15,800 | 26,800 | 19,200 | 16,900 |
| La | 0,065 | 0,037 | 0,110 | 0,029 | 0,050 | 0,120 | 0,067 | 0,077 | 0,110 |
| Ce | 0,190 | 0,092 | 0,300 | 0,074 | 0,080 | 0,160 | 0,049 | 0,063 | 0,140 |
| 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 | 0,010 | 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 | 0,030 | 0,025 | – | 0,012 | 0,002 | 0,001 | 0,001 |
| Pb | 0,170 | 0,076 | 0,059 | 0,063 | 1,000 | 5,100 | 1,000 | 0,540 | 0,980 |
| Th | 0,024 | 0,009 | 0,021 | 0,007 | 0,100 | 0,027 | 0,004 | 0,005 | 0,012 |
| U | 0,004 | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,500 | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,002 |

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

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

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

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

Из рис. 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 элементы K, Sb, Pb и Ba. Вахта, произрастающая в старом хасырее, наиболее богата такими макроэлементами, как Mg, Ca, Mn, Co, Rb, Sr и 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 (рис. 5).

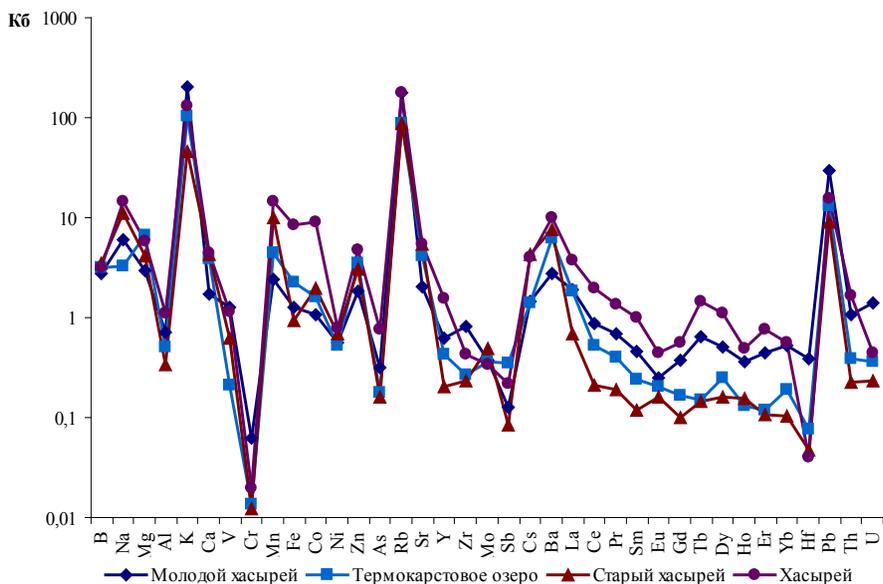


Рис. 5. Значения коэффициента биологического накопления химических элементов в вахте трехлистной относительно воды термокарстовых озер четырех озерных экосистем разных стадий развития

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

Озеро: K > 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: K > 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 (K, Mg, Na), значения Кб для которых меняются 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, так как рубидий может отчасти замещать позиции калия 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. Дополнительными факторами повышенной концентрации Mn в макрофитах конечных стадий могут 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 исследований, согласуются с ранее опубликованными работами [19, 20]. Также высокие содержания Mn, Fe и Pb отмечены 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 мелкокогловинные озера с темным цветом воды, торфяным дном. Они являются стадиями перехода элементов ландшафта от плоскобугристого болота до хасырея (спущенное озеро), в котором впоследствии происходят

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 элементы K, Sb, Pb и Ba. Вахта, произрастающая в старом хасырее, наиболее богата такими макроэлементами, как Mg, Ca, Co, Rb, Sr, Cs, Mn.

4. Наибольшим коэффициентом накопления характеризуются макроэлементы, а также микроэлементы Rb, Mn и др., что объясняется спецификой биогеохимической обстановки данной территории. В вахте трехлистной в больших количествах накапливаются некоторые тяжелые металлы (Pb, Zn, Sr, Co и др.), источниками которых могут служить как глобальные факторы (атмосферный перенос, водный режим и др.), так и различного рода локальные загрязнения (нефтяные «качалки», «лисьи хвосты» сжигаемого газа и др.) [23].

Литература

1. Куликова Н.Н., Парадина Л.Ф., Сутурин А.Н. и др. Микроэлементный состав круглогодично вегетирующих макроводорослей каменной 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. et al. 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. et al. Organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lake sediments // 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. СПб., 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. Крайцова 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., Dupre B. Heterotrophic bacterio-plankton in thawed lakes of the northern part of Western Siberia controls the CO₂ flux to the atmosphere // International Journal of Environmental Studies. 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. и др. Экологическая экспертиза состояния озер Ямало-Ненецкого автономного округа методом биогеохимической индикации // Экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики : тез. докл. междунар. конф. Томск, 2001. С. 153.

Поступила в редакцию 18.04.2012 г.

Rinat M. Manasypov^{1,2}, Sergey N. Kirpotin¹, Oleg S. Pokrovsky^{3,4},
Liudmila S. Shirokova⁴

¹Biological Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Université de Toulouse, UPS, Toulouse, France

³Géoscience Environnement Toulouse, Université de
Toulouse, CNRS-IRD-OMP, Toulouse, France

⁴Institute of Ecological Problems of the North, Russian
Academy of Science, Arkhangelsk, Russia

FEATURES OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF LAKE WATERS AND MACROPHYTES IN THERMOKARST SUBARCTIC ECOSYSTEMS OF WEST SIBERIA

*With increasing anthropogenic impact on the environment, including local contamination as a result of human activities as well as global pollution through long-range atmospheric transport, the question of accumulation trace elements on all levels of aquatic ecosystems is becoming increasingly important. Thermokarst lakes of the northern regions of Western Siberia as objects of hydrochemical and biogeochemical researches remained, up to present time, insufficiently studied: there are only fragmentary data on the hydrochemical composition of lake water and the biogeochemical processes occurring in the thermokarst lakes. In this work, we studied thermokarst lakes with coasts composed of peat sphagnum moss, peat sediments and detritus. As a biological model we selected the plant macrophyte *Menyanthes trifoliata* L. The general dynamics of chemical elements concentrations in *Menyanthes trifoliata* L. in all four ecosystems are very similar. However, there are some differences, in plants growing in the intertidal zone of thermokarst lakes most in comparison with other ecosystems, with respect to concentrations of K, Sb, Pb and Ba. Plants growing in the old khasyrei are mostly enriched by major elements such as Mg and Ca and trace elements Mn, Co, Rb, Sr, Cs. Minimal concentrations in plants of all ecosystems are typical for rare earth elements, immobile in fresh waters and biologically unavailable for plants, as well as for three- and tetravalent hydrolysates. In the course of work were calculated the coefficients of biological accumulation of chemical elements in *Menyanthes trifoliata* L. relative to water (K_b) for all the four stages of lake ecosystems development. High values of K_b are exhibited by macronutrients which are necessary for plants' life cycle (K, Mg, Na); these values vary dependent on the stage of lake development. In particular with the lake maturation we observe the decrease of K_b value for Mg, but also the increases the K_b of Na. The elements actively accumulating in *Menyanthes trifoliata* L. are Rb, Sr, Ba, Pb, which may be partially linked to possible contamination of the water reservoir (Pb). Data on the number of other elements obtained in the course of the work are in agreement to previously published works by other authors (i.e., high content of Mn, Pb, and low content of Cr). Another heavy metals strongly accumulating in grass *Menyanthes trifoliata* L. are Pb, Zn, Sr, Co, which may indicate various sources of long-range atmospheric pollution or local lexivation from thawing peat.*

Key words: Thermokarst subarctic ecosystems of Western Siberia; elemental composition; lake water; *Menyanthes trifoliata* L.; coefficient of biological accumulation.

Received April 18, 2012