

На правах рукописи



Манасыпов Ринат Мратович

**БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКОСИСТЕМ  
ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР СУБАРКТИКИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

03.02.08 – Экология (биология)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедре ботаники и в лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» в рамках гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки Российской Федерации № 14.B25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (BIO-GEO-CLIM)», и в лаборатории изучения геологических наук в окружающей среде (GET) Университета им. Поля Сабатье – Тулуза III (г. Тулуза, Франция).

**Научные  
руководители:**

доктор биологических наук, доцент,

**Кирпотин Сергей Николаевич** (Россия)

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

**Покровский Олег Сергеевич** (Франция)

**Официальные оппоненты:**

**Дюкарев Анатолий Григорьевич**, доктор географических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, отдел экологических исследований, заведующий отделом

**Воробьев Сергей Николаевич**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Научно-исследовательский институт биологии и биофизики, директор

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул

Защита состоится 16 декабря 2013 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.267.10, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (Главный корпус, ауд. 209).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд.биол.наук



Просекина Елена Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Озерно-болотные экосистемы субарктики Западной Сибири являются уникальными природными индикаторами климатических изменений, будучи наиболее чувствительными к изменениям природной среды в силу того, что имеют мерзлую торфяную залежь. В случае потепления климата, термокарст может охватить обширные пространства субарктики Сибири (Кирпотин и др., 1995; 2003; 2008; Кравцова, Быстрова, 2009; Мульдияров и др., 2001; Callaghan et al., 1999; Kirpotin, Vorobiov, 1999).

До недавнего времени большинство исследований термокарста, т.е. таяния льда вечной мерзлоты или пластовых льдов (Jorgenson et al., 2008), были проведены в Канаде, Аляске, Монголии, Китае, Антарктиде и Восточной Сибири (Boike et al., 2013; Kokelj, Jorgenson, 2013). При этом относительно мало изучены обширные территории Западной Сибири (Вомперский, 1994, 1999; Глаголев и др., 2007; Головацкая и др., 2008; Головацкая, Дюкарев, 2012; Инишева, Головацкая, 2002; Исаев, Коровин, 1999; Титлянова и др., 1998; Bleuten, Lapshina, 2001; Golovatskaya, Dyukarev, 2009; Frey, Smith, 2007; Kremenetski et al., 2003; Repo et al., 2007; Smith et al., 2004 и др.), где сосредоточены крупнейшие ресурсы потенциально нестабильных при климатических изменениях мерзлых торфяных болот.

На данный момент термокарстовые озера Западной Сибири изучены недостаточно, имеются лишь фрагментарные данные по их гидрохимическому составу и биогеохимическим циклам (Леонова, 2004; Леонова и др., 2005; Манасыпов и др., 2012; Московченко, 2010; Савичев и др., 2011; Савченко, 1992; Страховенко и др., 2009; Страховенко, 2011; Audry et al., 2011; Kirpotin et al., 2011; Pokrovsky et al., 2011; 2012; 2013; Shirokova et al., 2013 и др.).

**Целью работы** является анализ биогеохимических и ландшафтно-экологических особенностей экосистем термокарстовых озер субарктики Западной Сибири.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Установление зависимостей между концентрациями микро- и макроэлементов озерных вод и растворенным органическим углеродом, а также ландшафтно-экологическими стадиями формирования и развития термокарстовых озер.

2. Изучение концентрации растворенных компонентов воды в термокарстовых озерах разных стадий развития для прогнозирования изменения химического состава поверхностных вод при возможных климатических изменениях на широтном профиле севера Западной Сибири.

3. Определение концентраций химических элементов в макрофитах, донных отложениях, озерных и поровых водах термокарстовых озер субарктики Западной Сибири.

4. Расчет коэффициентов биологического накопления химических элементов в макрофитах относительно поровых вод и донных отложений для выявления биогеохимических процессов происходящих в термокарстовых озерах и определения индикаторных свойств макрофитов.

**Защищаемые положения:**

1. Химический элементарный состав воды термокарстовых озер и содержание растворенного органического углерода обусловлены ландшафтно-экологической стадией развития озерных экосистем и могут являться индикаторами интенсивности криогенных процессов в ландшафте.

2. Изученные виды макрофитов термокарстовых озер субарктики Западной Сибири характеризуются высокой аккумулирующей способностью по отношению к некоторым тяжелым металлам (Ni, Cu, Zn, Pb), что позволяет рекомендовать их в качестве фитоиндикаторов при проведении биогеохимических исследований и оценке химического загрязнения водной среды.

### **Научная новизна.**

1. При изучении сопряженных компонентов экосистем термокарстовых озер получены новые данные о биогеохимических циклах химических элементов севера Западной Сибири.

2. Впервые выявлены сопряженные с растворенным углеродом особенности химического состава озерных вод различных ландшафтно-экологических стадий развития термокарстовых озер севера Западной Сибири.

3. Впервые изучены широтные особенности химического состава термокарстовых озер Западной Сибири на 900 км профиле многолетней мерзлоты, что позволило прогнозировать изменение концентраций растворенного органического углерода, макро- и микроэлементов при возможных изменениях климата.

**Теоретическая и практическая значимость.** Найдены надежные маркеры климатических изменений, проявляющиеся в новейшей динамике термокарстовых озер ландшафтов плоскобугристых болот Западной Сибири, которая четко сопряжена с органическим углеродом и химическим составом озерных вод.

Результаты работы могут быть использованы как базовые составляющие биогеохимического фона, с которыми будут сравниваться изменения химического состава поверхностных вод севера Западной Сибири, происходящие при климатических изменениях и увеличении антропогенной нагрузки на данную территорию. Также полученные в ходе работы данные могут быть использованы для построения прогнозных моделей переноса химических элементов и растворенного органического углерода из водно-болотных угодий севера Западной Сибири в Северный Ледовитый океан при дренаже термокарстовых озер в речную сеть. Кроме того, результаты работы могут быть использованы в инженерно-геологических изысканиях, а также при составлении геокриологического прогноза ландшафтов субарктики Западной Сибири.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на международной конференции «Proceedings of International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010» (г. Томск, 2010 г.); I Всероссийской научно-практической конференции «Научное наследие В.И. Вернадского и современные проблемы науки» (г. Чебоксары, 2010); Международной конференции «EGU Leonardo conference on the hydrological cycle 2010» (Люксембург, 2010); Всероссийской конференции молодых ученых «Современные проблемы геохимии» (г. Иркутск, 2011); V Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы генезиса, географии и картографии почв» (г. Томск, 2011); Международной конференции «Проблемы изучения, сохранения и рационального использования водных и околоводных экосистем» (г. Алматы, 2012); IV Международной конференции «Биогеоэкология и ландшафтная экология: итоги и перспективы» (г. Томск, 2011).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 2 в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 158 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, выводов, 1 приложения, содержит 21 рисунка и 10 таблиц. Библиографический список включает 156 источников, из них 67 иностранных.

**Благодарности.** Автор глубоко благодарен научным руководителям, доктору биологических наук С.Н. Кирпотину и кандидату геолого-минералогических наук О.С. Покровскому за постоянное внимание к проводимым работам, кандидату биологических наук Л.С. Широковой и доктору геолого-минералогических наук Г.А. Леоновой за ценные советы и помощь в осмыслении материала, а также всем сотрудникам Лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Биологического института ТГУ за постоянную поддержку и помощь в проведении полевых работ.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования, его научная новизна и практическая значимость.

### **1. ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

В Главе приводится характеристика климата, рельефа, почвообразующих пород и растительного покрова, а также процесса болотообразования на фоне криогенных процессов, происходящих на данной территории.

### **2. РАЙОН, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Глава 2 состоит из двух разделов. Раздел 2.1 посвящен описанию района исследований. Территория исследований находится в пределах тундровой и лесотундровой зон севера Западной Сибири (рис. 1).

Данный район характеризуется повсеместным распространением преимущественно малых озер с площадью водного зеркала менее 1 км<sup>2</sup> (Болота Западной Сибири..., 1976; Доманицкий и др., 1971; Кравцова, Быстрова, 2009; Рихтер, 1963). Изученные нами водные объекты представляют собой термокарстовые озера с берегами, сложенными торфяной толщей (Тыртиков, 1976). Донные отложения озер представлены торфяным детритом, а также деградировавшей при затоплении торфяной почвой (Audry et al., 2011). Наиболее крупные термокарстовые озёра, возникающие в торфяниках, имеют размеры до 1 км и более (Козлов, 2005; Савченко, 1992) при незначительной глубине 0,5–1,5 м.

Все исследованные термокарстовые озера Западной Сибири в зависимости от их ландшафтно-экологических особенностей были условно разделены на пять размерных и возрастных классов, четко привязанных к стадиям сукцессионного цикла развития плоско-бугристого комплекса, а именно: (1) от 2 до 10 м (эмбрионические), (2) от 11 до 100 м (молодые), (3) от 100 до 500 м (зрелые), (4) > 500 м (старые) и (5) дренированные или спущенные озера (хасыреи). При выделении стадий развития термокарстовых озер Западной Сибири мы основывались на описанном ранее механизме их образования и цикличности развития (Кирпотин и др., 2008; Kirpotin et al., 2007; Pokrovsky et al., 2011).



Рис. 1 Карта-схема района исследований. 1 – район окр. п. Гыда (Гыданский п-ов), тундровая зона, зона сплошного распространения многолетнемерзлых пород; 3, 2 – районы окр. г. Новый Уренгой, лесотундровая зона, зона прерывистого распространения многолетнемерзлых пород.

В общей сложности было обследовано 43 континентальных термокарстовых озерных экосистемы и 15 прибрежных озерных экосистем в пределах субарктической зоны Западной Сибири. Для характеристики изменчивости химического состава воды термокарстовых озер вдоль ~ 900 км широтного профиля, также были использованы ранее опубликованные данные по гидрохимии вод термокарстовых озер южной части криолитозоны (район г. Ноябрьск, Shirokova et al., 2009; 2013).

В Разделе 2.2 подробно описаны методики полевых и лабораторных исследований выбранных объектов. Объектами исследования служили озерная вода, макрофиты, донные отложения и поровая вода озерных термокарстовых экосистем севера Западной Сибири. Методики отбора и анализа образцов воды (поровой и озерной) подробно описаны в работах (Шишкина, 1972; Pokrovsky et al., 2010; 2011; 2012; Vasyukova et al., 2010), макрофитов (Манасыпов и др., 2012), донных отложений (Страховенко и др., 2010; Страховенко, 2011; Audry et al., 2011).

Микроэлементный состав всех исследованных образцов был проанализирован с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7500 CE) с использованием индия и рения в качестве внутренних стандартов с точностью  $\pm 5\%$ . Статистическая обработка данных и построение диаграмм проводились с использованием пакета программ STATISTICA 6.0 и MS Excel 2010.

### 3. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И МАКРОФИТОВ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Глава 3 содержит три раздела, в которых рассмотрен химический состав макрофитов, донных отложений и поровых вод термокарстовых озер, а также

проанализированы коэффициенты распределения химических элементов в макрофитах термокарстовых озер Западной Сибири.

Для изучения химического состава донных отложений и поровых вод, а также для расчета коэффициентов биологического накопления изучены четыре наиболее характерные экосистемы термокарстовых озер: три тундровых озера в окр. п. Гыда (RM55, RM57, RM58) и одно термокарстовое озеро (RM64) в лесотундровой зоне (окр. п. Пангоды).

### 3.1 Химический состав макрофитов севера Западной Сибири

Всего было изучено шесть видов растений являющихся доминантами (всего 20 образцов растений). Исследованные виды макрофитов: *Hippuris vulgaris* L. (Хвостовник обыкновенный); *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb. (Манник большой); *Comarum palustre* L. (Сабельник болотный); *Ranunculus spitzbergensis* Hadac (Лютик шпизбергский); *Carex aquatilis* Wahlenb s. str. (Осока водяная); *Menyanthes trifoliata* L. (Вахта трехлистная).

Изменение содержания химических элементов в изученных видах растений в общем виде может быть представлено в виде графика (рис. 2).



Рис. 2 Содержание химических элементов в макрофитах севера Западной Сибири, n – количество проанализированных образцов.

Общая динамика содержания химических элементов во всех исследованных нами растениях одинакова. Однако имеются некоторые отличия, так в Хвостовнике обыкновенном наиболее, по сравнению с другими изученными видами растений, накапливаются такие элементы как Na и Fe, для Лютика шпизбергского также характерно высокое содержание Na и B, что может быть объяснено их произрастанием вблизи Карского моря. Алюминий активно накапливается Манником большим до значения 2141,8 мг/кг, что практически в сто раз больше, чем содержание алюминия в Осоке водяной (22,7 мг/кг). Среди тяжелых металлов наименьшие концентрации во всех изученных видах макрофитов имеет сурьма. Важно отметить минимальную концентрацию урана в Осоке водяной по сравнению с другими видами изученных растений.

Минимальными концентрациями в растениях всех изученных экосистем характеризуются редкоземельные элементы (РЗЭ), а также трех- и четырехвалентные гидролизаты. Представляется интересным уменьшение общей концентрации РЗЭ в ряду: Сабельник болотный > Манник большой > Хвостовник

обыкновенный > Лютик шпизбергенский > Вахта трехлистная > Осока водяная, что вероятно объясняется видоспецифичностью в их накоплении.

*Видовые особенности концентрационной функции макрофитов по отношению к тяжелым металлам (ТМ)*

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

Для характеристики видовых особенностей концентрационной функции макрофитов нами был рассчитан Коэффициент специфического относительного накопления (КСОН), описанный в работах (Панин, Сви́дерский, 2002; Kabata-Pendias, Krakowiak, 1998). КСОН вычисляется как отношение содержания элемента в растении к среднему содержанию этого элемента во всех других растениях, растущих на одной территории и в одинаковых условиях (Панин, Сви́дерский, 2002). В таблице 1 приведены значения КСОН для шести изученных видов макрофитов по отношению концентраций в них ТМ.

Таблица 1 – Коэффициент специфического относительного накопления (КСОН) тяжелых металлов в макрофитах исследованных термокарстовых экосистем.

| Вид растения            | Mn          | Fe          | Co          | Ni          | Cu          | Zn   | As          | Sb          | Pb          |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------|
| Хвостовник обыкновенный | 1,50        | <b>6,58</b> | <b>3,08</b> | 0,71        | 1,41        | 1,44 | <b>4,53</b> | 1,04        | 0,67        |
| Манник большой          | 0,25        | 1,06        | 0,38        | 0,64        | 0,71        | 0,42 | 1,16        | <b>2,23</b> | 1,70        |
| Сабельник болотный      | <b>2,03</b> | 0,58        | 0,94        | <b>3,59</b> | <b>2,06</b> | 0,83 | 0,88        | 1,85        | 0,48        |
| Лютик шпизбергенский    | <b>2,32</b> | 0,52        | 1,75        | 1,16        | 1,45        | 0,94 | 0,52        | 0,34        | 0,06        |
| Осока водяная           | 0,35        | 0,09        | 0,13        | 0,26        | 0,45        | 1,80 | 0,25        | 0,55        | 0,26        |
| Вахта трехлистная       | 0,26        | 0,21        | 0,59        | 0,60        | 0,31        | 0,77 | 0,24        | 0,47        | <b>4,61</b> |

Как видно из таблицы 1 самым подходящим фитоиндикатором для Fe, Co, As является Хвостовник обыкновенный. Для сурьмы – Манник большой. Сабельник болотный может являться фитоиндикатором для Ni и Cu. Повышенное по сравнению с другими видами макрофитов содержание марганца характерно для Сабельника болотного и Лютика шпизбергенского. Свинец наиболее активно накапливается в Вахте трехлистной.

Важно отметить, что индикаторную функцию по отношению к концентрации РЗЭ может выполнять Сабельник болотный. Значение КСОН данного растения для РЗЭ варьируют от 3,5 до 5,72, что в среднем в четыре раза превышает показатели КСОН для других видов исследованных растений.

### 3.2 Химический состав донных отложений и поровых вод

#### 3.2.1 Донные отложения

##### *Органический углерод и сера*

Ранее было показано (Audry et al., 2011) органический углерод донных отложений озер данного региона составляет до 95 % от общего углерода отложений. Как видно из рисунка 3 имеются различные тенденции накопления органического углерода в донных отложениях изученных озер.

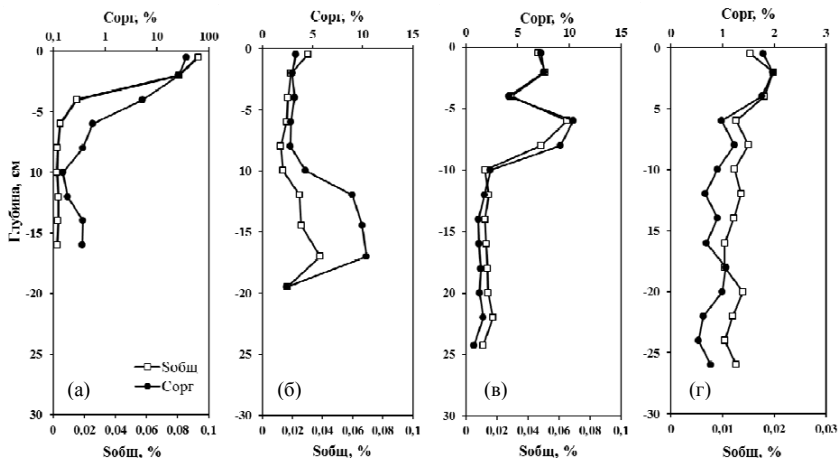


Рис. 3 Содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) и общей серы ( $S_{общ}$ ) в четырех наиболее характерных колонках донных отложений исследованных озерных экосистем: а – RM64, б – RM57, в – RM58, г – RM55

Из рисунка 3 видно, что в донных отложениях (а, б, в) можно выделить две части в зависимости от концентрации  $C_{орг}$ : «органическую» и «минеральную». Донные отложения арктического озера RM55 не показывают зависимости содержания  $C_{орг}$  с глубиной, среднее содержание составляет  $1,07 \pm 0,46$  %.

В условиях севера Западной Сибири происходит неполная деструкция органического вещества, которая не обеспечивает полного разложения трудноокисляемых веществ и органического материала. Подтверждением неполной деградации органического материала в водной среде служат высокие значения содержания  $C_{орг}$  не только в поверхностном слое, но и при углублении в толщу донных отложений.

#### *Железо и марганец*

Средние концентрации Fe, Mn и TM представлены в таблице 2.

Как известно, железо и марганец являются типоморфными для данной территории элементами. Их концентрация и миграционные свойства во многом обуславливают геохимические условия исследованных нами экосистем термокарстовых озер.

Содержание Fe и Mn в донных отложениях озера (RM64) характеризуется постепенным снижением концентрации в «органической части» на первых 8 см, затем происходит резкое увеличение концентрации Mn до  $220,3 \pm 94,5$  мкг/кг, Fe до  $6953 \pm 2067$  мкг/кг. Максимумы концентраций наблюдаются на глубине 12 см. Таким образом, наблюдается обратная динамика накопления Mn и Fe относительно  $C_{орг}$ .

Динамика содержания железа в донных отложениях озер тундровой зоны Западной Сибири в целом совпадает с динамикой содержания  $C_{орг}$  отложений и характеризуется высокими коэффициентами корреляции. Так, для озера RM57 ( $R^2_{Fe-C_{орг}}=0,89$ ; Fe:  $18841 \pm 5851$  мкг/кг); для озера RM58 ( $R^2_{Fe-C_{орг}}=0,81$ ; Fe:  $7156 \pm 2479$  мкг/кг); для озера RM55 ( $R^2_{Fe-C_{орг}}=0,93$ ; Fe:  $16655 \pm 4896$  мкг/кг).

Содержанием марганца характеризуется схожей динамикой: для озера RM57 ( $R^2_{Mn-C_{орг}}=0,90$ ; Mn:  $396 \pm 68,3$  мкг/кг); для озера RM55 ( $R^2_{Mn-C_{орг}}=0,85$ ; Mn:  $318,6 \pm 91$  мкг/кг);

для озера RM58 корреляция Mn и  $C_{\text{орг}}$  составляет 0,20, но важно отметить, что для первых 10 см «органической части»  $R^2_{\text{Mn-C}_{\text{орг}}}=0,81$  (Mn:  $128,5 \pm 27,2$  мкг/кг).

#### *Тяжелые металлы и металлоиды*

В донных отложениях озера RM64 все изученные концентрации ТМ имеют схожую динамику изменения с глубиной с минимумом на 8 см. Данный минимум совпадает с границей между «органической» и «минеральной» частями донных отложений. Co, Ni и Cu связаны с  $C_{\text{орг}}$ , что подтверждается высокими коэффициентами корреляции. Остальные элементы показывают высокую зависимость от концентрации железа.

В тундровом термокарстовом озере RM57 Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd и Sb показывают высокую зависимость от концентраций Fe и  $C_{\text{орг}}$ . Содержание свинца в донных отложениях данного озера практически не изменяется с глубиной.

В озере RM58 с железом связаны Co, Ni, Zn, As, Cd. С марганцем связаны только Sb и Pb, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициента корреляции (0,77 и 0,72, соответственно). Минимальное значение концентрации всех изученных ТМ наблюдается на глубине 10 см. Концентрация меди не показывает зависимости от  $C_{\text{орг}}$ , Fe и Mn и уменьшается до глубины 10 см от 3,1 до 1,0 мг/кг, затем увеличивается с глубиной до 5,0 мг/кг.

В арктическом озере RM55 As и Pb не имеют заметной зависимости от  $C_{\text{орг}}$ , Fe и Mn, что объясняется незначительной корреляцией. Cd и Sb связаны с Mn и Fe и не имеют заметной связи с  $C_{\text{орг}}$ . Для остальных элементов (Co, Ni, Cu, Zn) характерны высокие значения корреляции ( $> 0,80$ ) и с максимумом на глубине 4 см.

Высокие показатели корреляции для химических элементов донных отложений показывают, что содержание данных элементов регулируется содержанием  $C_{\text{орг}}$  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 нами колонки донных отложений характеризуются повышенным содержанием  $C_{\text{орг}}$  и мелкодисперсностью, что может обуславливать их высокую сорбционную ёмкость.

Таблица 2 – Средняя концентрация и стандартное отклонение ( $\pm 2\sigma$ ) Fe, Mn, микроэлементов и металлоидов (мг/кг) в донных отложениях изученных озер

| Озеро                                     | Fe               | Mn               | Co             | Ni              | Cu            | Zn             | As            | Cd              | Sb              | Pb             |
|-------------------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|
| RM64                                      | 5230 $\pm$ 2497  | 146,5 $\pm$ 99   | 2,4 $\pm$ 1,1  | 5,4 $\pm$ 3,8   | 4,8 $\pm$ 3,1 | 10,7 $\pm$ 4,2 | 1,1 $\pm$ 0,3 | 0,09 $\pm$ 0,04 | 0,19 $\pm$ 0,05 | 5,6 $\pm$ 1,4  |
| RM57                                      | 1884 $\pm$ 5851  | 396 $\pm$ 68,3   | 8,2 $\pm$ 1,8  | 18,6 $\pm$ 5,5  | 14 $\pm$ 4,5  | 35,6 $\pm$ 10  | 3,3 $\pm$ 0,6 | 0,14 $\pm$ 0,03 | 0,3 $\pm$ 0,03  | 8,2 $\pm$ 0,03 |
| RM58                                      | 7156 $\pm$ 2479  | 128,5 $\pm$ 27,2 | 2,8 $\pm$ 0,8  | 6,2 $\pm$ 2,3   | 3 $\pm$ 1,1   | 13,8 $\pm$ 5,3 | 2,1 $\pm$ 0,8 | 0,06 $\pm$ 0,02 | 0,16 $\pm$ 0,03 | 5,9 $\pm$ 1,1  |
| RM55                                      | 16655 $\pm$ 4896 | 318,6 $\pm$ 91   | 8 $\pm$ 1,7    | 16,3 $\pm$ 3,7  | 9,1 $\pm$ 2,6 | 28,6 $\pm$ 5,6 | 3,4 $\pm$ 0,4 | 0,12 $\pm$ 0,02 | 0,3 $\pm$ 0,03  | 8,4 $\pm$ 0,4  |
| Активно растущее термокарстовое озеро (1) | 11984 $\pm$ 1232 | 148,5 $\pm$ 16,5 | 5,9 $\pm$ 0,14 | 14,8 $\pm$ 0,76 | 8,4 $\pm$ 1,4 | 24,8 $\pm$ 4,6 | 3,9 $\pm$ 0,7 | 0,15 $\pm$ 0,06 | 0,17 $\pm$ 0,1  | 7,2 $\pm$ 1,04 |
| Торфяные почвы Западной Сибири (2,3)      | 5800             | 184              | 4,2            | 6,8             | 4,9           | 17,8           | 0,52          | 0,04            | 0,21            | 4,8            |
| Донные отложения рек (4,5,6)              | 8124             | 470              | 6              | 10              | 26,5          | 44,5           | 3,8           | 0,11            | -               | 10,5           |
| Донные отложения Нижней Оби (7)           | 3800             | 800              | -              | 40              | 20            | 50             | -             | -               | -               | 10             |

Примечание: (1) - Audry et al., 2011; (2,3) - Московченко, 2006; Степанова, 2011; (4,5,6) - Сорокина и др., 2007; Савичев и др., 2011; Гертер и др., 2011; (7) - Уварова, 2011; «-» - отсутствие данных.

Таблица 3 – Коэффициенты подвижности химических элементов в поровых водах изученных озер.

| Номер пробы | H > 10                    | H = (10–5)                    | H = (5–1)                                                    |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| RM64        | Zn, Cu                    | B, Mg, Co, Ni, Mn, Sb, Ca, As | Cd, Na, Cr, Mo, W, Fe, U, V, Th, Sr, PЗЭ                     |
| RM57        | B                         | Mg, Ca, Zn                    | Na, Cd, Cu, Sb, Mo, Sr, Ni                                   |
| RM58        | B, Cu                     | Zn                            | Mg, W, Na, Cd, Sb, Ni, V, As, Fe, Ca, Mo, Co, Cr, Mn, K, PЗЭ |
| RM55        | Mn, B, Co, Mg, Ni, Ca, Cd | Cu                            | Zn, Na, K, Sr, Sb                                            |

### 3.2.2 Поровые воды

Поровые воды исследованных колонок донных отложений имеют слабокислую среду, pH варьирует от 3,53 до 5,01. Во всех четырех изученных озерах в поровых водах прослеживается снижение pH минимум на единицу по отношению к озерной воде.

Наблюдается увеличение удельной электропроводимости в поровой воде относительно озерных вод, а также активное накопление хлоридов, сульфатов и растворенного органического углерода (РОУ) во всех озерах.

Для соотношения содержания химических элементов в поровых водах относительно донных отложений нами были посчитаны коэффициенты подвижности химических элементов (Мальцев и др., 2012) (табл. 3).

Подвижность химических элементов, характеризующую их содержание в поровой воде, выявляли путем расчета коэффициента подвижности ( $K_n$ ), он рассчитывался как отношение концентрации растворенной формы элемента к его концентрации в твердой фазе (осадок). Для удобства восприятия масштаба значений  $K_n$  этот показатель умножили на 10000 и обозначили как  $N = K_n \times 10000$ .

$$N = C_{i \text{ вода}} / C_{i \text{ осадок}} \times 10000,$$

где  $N$  - «коэффициент подвижности» (отн.ед.).

В таблице 3 представлены химические элементы, условно разделенные нами на три группы относительно их подвижности.

Для термокарстового озера зоны лесотундры (RM64) наибольшими коэффициентами подвижности характеризуются цинк и медь, что, по-видимому, связано с общим увеличением РОУ в поровых водах данного озера. Увеличение подвижного бора в изученных озерах прибрежной зоны объясняется влиянием морских аэрозолей. В озере RM58 наиболее подвижными элементами являются бор и медь, присутствие меди объясняется повышенной концентрацией РОУ в данном озере в сравнении с RM57 и RM55. Наличие в озере RM55 подвижных Ca и Mg может говорить об их ионной форме нахождения в поровых водах данного озера. Малые значения коэффициента подвижности железа во всех четырех изученных термокарстовых озерах могут объясняться диффузионным транспортом железа в придонную воду при восстановлении его гидроксидов (Audry et al., 2011).

### 3.3 Коэффициенты распределения химических элементов в макрофитах термокарстовых озер Западной Сибири

Посчитаны коэффициенты биологического накопления химических элементов в макрофитах четырех изученных озерных экосистем относительно донных отложений ( $K_b$ ) и поровых вод ( $K_{b_{pw}}$ ).

Коэффициенты биологического накопления рассчитывались как отношение концентрации химического элемента в траве растения к его концентрации в среде:

$$K_b = C_{i \text{ [макрофит]}} / C_{i \text{ [осадок]}}$$
$$K_{b_{pw}} = C_{i \text{ [макрофит]}} / C_{i \text{ [поровая вода]}},$$

где  $Kb_s$  – коэффициент биологического накопления относительно донных отложений;  $Kb_{pw}$  – коэффициент биологического накопления относительно поровой воды;  $C_{i \text{ [макрофит]}}$  – концентрация  $i$ -го химического элемента в макрофите (мг/л);  $C_{i \text{ [осадок]}}$  – концентрация  $i$ -го химического элемента в донных отложениях (мг/л);  $C_{i \text{ [поровая вода]}}$  – концентрация  $i$ -го химического элемента в поровой воде (мг/л).

На рисунке 4 представлены коэффициенты накопления химических элементов в макрофитах относительно поровых вод ( $Kb_{pw}$ ).

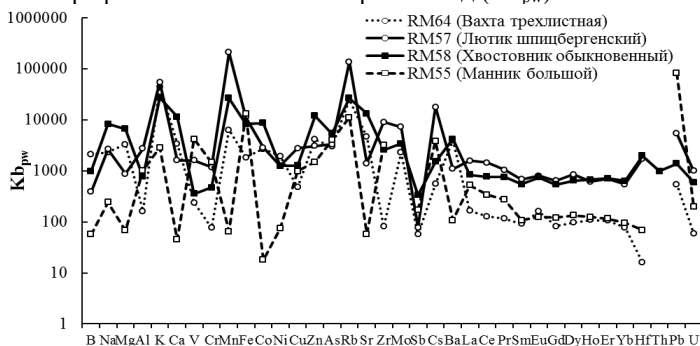


Рис. 4 Значения Коэффициента биологического накопления ( $Kb_{pw}$ ) химических элементов в изученных растениях относительно поровых вод.

Как видно из рисунка 4 для всех исследованных макрофитов относительно высокими значениями  $Kb_{pw}$  характеризуются химические элементы необходимые растениям в процессе жизнедеятельности. Высокое накопление Rb наравне с K объясняется их физиологической схожестью, т.к. рубидий может отчасти замещать позиции калий в соединениях (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Ранее было описано, что Mn обладает высокой биогеохимической активностью в тундровых и таежных ландшафтах (Глазовская, 1988; Московченко и др., 2012). Данная тенденция накопления марганца закономерна для Вахты, Лютика и Хвостовника в которых он активно накапливается относительно поровых вод. 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.

Данные виды изученных макрофитов (Вахта трехлистная, Лютик шпигбергенский и Хвостовник обыкновенный) характеризуются сходными тенденциями накопления химических элементов относительно поровой воды и не проявляют заметных особенностей.

Манник большой характеризуется активным накоплением свинца, железа, ванадия и мышьяка и практически не накапливает кобальта, марганца, кальция и магния относительно поровой воды. Очевидно, это может быть объяснено специфичностью данного вида, что позволяет выделить его в виде биоиндикатора содержания тяжелых металлов.

Также нами посчитан Коэффициент биологического накопления химических элементов в макрофитах относительно донных отложений ( $Kb_s$ ) (рис. 5).

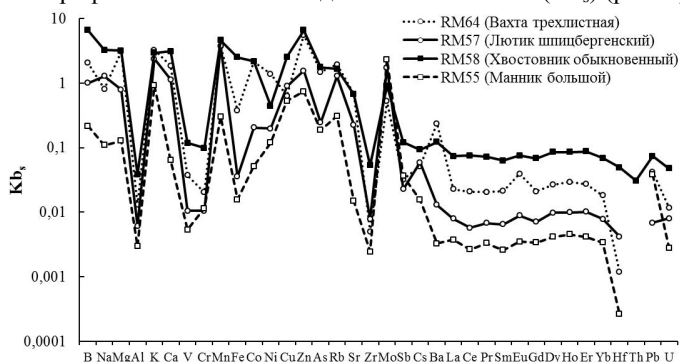


Рис. 5 Значения Коэффициента биологического накопления  $Kb_s$  химических элементов в изученных растениях относительно донных отложений.

Как видно из рисунка 5 наиболее активно в Вахте трехлистной и Хвостовнике обыкновенном накапливается цинк и для него характерны наиболее высокие значения коэффициента биологического накопления, что может быть объяснено его повышенными концентрациями во всех изученных донных отложениях. В остальных изученных видах макрофитов цинк увеличивает свое накопление в сравнении с поровой водой. Также происходит относительное увеличение накопления марганца, что подтверждает ранее описанную закономерность его накопления, а также калия и бора. Накопление рубидия уменьшается, что может объясняться увеличением сорбционной функции донных отложений, в присутствии органического вещества (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Увеличение накопления бора относительно донных отложений может быть объяснено его подвижностью в поровой воде и присутствием в растворенной форме.

Активное накопление молибдена в Лютике шпизбергенском и Манике объясняется районом их произрастания (прибрежная зона, влияние морских аэрозолей), также он характеризуется достаточно высокой подвижностью в поровых водах донных отложений.

Как видно из рисунка 5 для некоторых химических элементов имеются отличия значений  $Kb_s$  от  $Kb_{pw}$ .

Для характеристики активности накопления химических элементов в изученных нами видах макрофитов относительно разных сред, нами было проведено сравнение значений коэффициентов биологического накопления ( $Kb_{pw}$  и  $Kb_s$ ). Для удобства восприятия масштаба значений,  $Kb_{pw}$  был разделен на 10000. Различия в показателях  $Kb_s$  и  $Kb_{pw}$  для химических элементов, накапливающихся в траве макрофитов, могут говорить о различной интенсивности их поглощения водными растениями данной территории.

Так, всеми видами макрофитов активно относительно донных отложений накапливаются следующие химические элементы: В, Na, Mg, Ca, Ni, Cu, Zn, Мо.

Накопление химических элементов макрофитами относительно поровых вод характеризуется единичными высокими показателями коэффициента. Имеется только один элемент, активно накапливающийся во всех макрофитах относительно поровой воды – Rb.

Так, для Вахты трехлистной характерно более активное накопление К и его изоморфы Rb относительно поровых вод. Лютик шпизбергенский активно накапливает относительно поровой воды: К, Mn, Fe, Rb, Cs (значения  $Kb_{pw}$  более чем в 2–7 раз выше  $Kb_s$ ) и менее активно Pb. Особенностью данного вида может являться активное накопление марганца относительно поровой воды ( $Kb_{pw} = 21,16$ ). Манник большой накапливает свинец относительно поровых вод ( $Kb_{pw} = 8,16$ ), а также железо. Активное накопление свинца, который обладает высокой биоаккумуляционной активностью в водной среде (Kabata-Pendias, 2004), в Маннике большом может говорить о его специфичности и биоиндикаторных свойствах по отношению к данному химическому элементу.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что в макрофитах термокарстовых озер севера Западной Сибири, активно накапливаются относительно донных отложений макроэлементы (Na, Mg, Ca), некоторые тяжелые металлы (Ni, Cu, Zn), а также В и Мо. Для всех изученных макрофитов характерно активное накопление рубидия относительно поровых вод. Накопление остальных химических элементов относительно поровых вод является индивидуальным для каждого вида и может говорить о видоспецифичности данных видов растений.

#### **4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОЗЕРНЫХ ВОД КАК ИНДИКАТОР РАЗВИТИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

##### *Основные анионы, электропроводность и рН*

Все изученные термокарстовые озера континентальной зоны Западной Сибири питаются атмосферными осадками, концентрации хлоридов и сульфатов составляют от 0,014 до 1,12 и от 0,04 до 1,1 мг/л соответственно. Для изученных озер прибрежной зоны Западной Сибири характерны следующие содержания хлоридов (0,6–6,9 мг/л) и сульфатов (0,02–1,6 мг/л). Большой разброс значений в содержании хлоридов может объясняться различной степенью влияния морских аэрозолей.

Средние значения электропроводности (ЭП) в озерных водах континентальной зоны варьирует в различных стадиях озер от 10 до 17 мкС/см, максимальные значения (~ 20 до 30 мкСм/см), характерны для 1-й и 2-й стадий развития. Для озер прибрежной зоны, ЭП значительно выше (в среднем 73 мкСм/см, с диапазоном от 40 до 250 мкСм/см), что соответствует более высокой концентрации основных ионов.

рН воды континентальных термокарстовых озер изменяется от 3,9 до 5,4; для первой стадии развития озер характерны более кислые условия по сравнению с

другими стадиями. Прибрежные озера обладают значительно более высоким рН в диапазоне от 6,2 до 6,6.

#### *Растворенный органический углерод*

Значение концентрации РОУ представлены на рисунке 4.4.

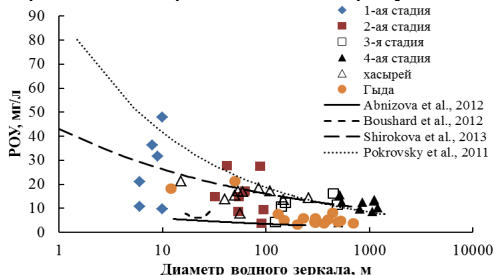


Рис. 6 Значения концентрации растворенного органического углерода (РОУ, < 0,45 мкм) изученных озерных вод как функция от диаметра водного зеркала.

Вода термокарстовых озер континентальной зоны имеет более высокую концентрацию РОУ на 1-й и 2-й стадиях развития ( $18,1 \pm 15,4$  и  $15,3 \pm 8,1$  мг/л, соответственно) по сравнению со зрелыми озерами ( $11,0 \pm 4,3$  и  $11,1 \pm 3,4$  мг/л, 3-ей и 4-ой стадий, соответственно). После осушения крупных озер с образованием хасырея (5-й этап развития), содержание РОУ вновь возрастает до  $15,6 \pm 3,6$  мг/л. Это увеличение может быть связано с развитием водных растений, фитопланктона и перифитона, что способствует производству автохтонных экзометаболитов.

Концентрация РОУ в озерах окрестностей пос. Гыда колебалась от 3,2 до 21,3 мг/л, наибольшая концентрация характерна для малых озер (< 100 м в диаметре). Средняя концентрация РОУ составляет 7 мг/л, что в 2 раза ниже по сравнению с термокарстовыми озерами континентальной зоны.

#### *Макро- и микроэлементы в термокарстовых озерах*

Fe и Al являются одними из основных растворенных компонентов в водной толще и биогеохимия большинство микроэлементов, обуславливается их ассоциацией с Fe, Al-богатыми органоминеральными коллоидами (Pokrovsky et al., 2011).

Самые высокие концентрации Fe, Si и РОУ наблюдаются в начале формирования озера, а самые низкие в больших зрелых озерах. Прибрежные арктические озера показывают более высокие концентрации щелочных и щелочноземельных элементов. Это, скорее всего, связано с влиянием морских солей (морские аэрозоли, влияние подземных соленых вод), а также распространением морских неогеновых глин.

Средние концентрации элементов в водах озер континентальной зоны могут быть описаны следующим образом, для первых десяти самых распространенных элементов:

Первая, начальная стадия (диаметр поверхности воды составляет от 2 до 10 м): Fe>Si>Ca>Na>Mg>Al>K>Mn>Zn>Cr;

2-ая стадия (диаметр от 10 до 100 м): Ca>Fe>Si>Mg>Na>Al>K>Mn>Zn>Cr;

3-я стадия (диаметр от 100 до 500 м): Ca>Na>Si>Mg>Fe>K>Al>Mn>Zn>Cr;

4-ая стадия (диаметр > 500 м): Ca>Na>Mg>Si>K>Fe>Al>Zn>Mn>Sr;

5-ая стадия озер или хасырей: Ca>Si>Fe>Mg>Na>Al>K>Mn>Zn>Sr.

Таким образом, можно наблюдать эволюцию химического состава термокарстовых озер, от Fe-Si вод в начале формирования озера до Ca-Na-Mg вод в зрелых озерах 4-й стадии. Конечная 5-ая стадия характеризуется увеличением относительного вклада Si, K и Fe, которые, вероятно, накапливаются в связи с развитием и разложением макрофитов и фитопланктона в водах, оставшихся в хасырее.

Прибрежные арктические озера обладают следующим порядком снижения концентрации растворенных элементов: Na>Mg>Ca>K>Si>Fe>Al>Zn>Sr>Mn. Изученные озера прибрежной зоны по концентрации основных элементов соотносятся с термокарстовыми озерами континентальной зоны 4-й стадии развития, с несколько меньшим вкладом Fe и Si и увеличением вклада Na.

Данные о составе воды термокарстовых озер позволяют выделить четыре группы химических элементов, отражающих сукцессию термокарстовых озер, с 1-ой до последней стадии: (1) концентрации элементов уменьшаются от 20 до 90 % в процессе развития озер: Cr, Cs, Mo, Ga; (2) концентрации элементов увеличиваются от 35 до 55 % в процессе созревания озер: Ca, Li, Mg, Se; (3) концентрации элементов являются высокими на начальном и конечном этапах и низкими в зрелых озерах > 100 м в диаметре (изменения концентраций от 26 до 83 %): As, Co, Fe, Al, Si, Cd; (4) концентрации элементов являются низкими в начале и в конце развития экосистем и высокими в зрелом озере, размер которых превышает 100 м в диаметре: V, U, Rb, B, K и главные анионы (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) с относительным изменением концентрации от 32 до 83 %. Снижение концентраций химических элементов в 1-ой и 3-ей группах элементов в течение развития озерных термокарстовых экосистем может быть связано с существенно коллоидным статусом этих элементов, которые присутствуют в виде органо-железистых коллоидов (1 кДа - 0,45 мкм) (Pokrovsky et al., 2011; Shirokova et al., 2013). Уменьшение РОУ и концентрации Fe в течение развития озерной экосистемы приводит к снижению концентрации аллохтонных органоминеральных коллоидов, которые связывают эти микроэлементы.

Остальные элементы в термокарстовых озерах субарктики не демонстрируют каких-либо систематических вариаций концентраций со стадией развития озер.

*Концентрация химических элементов в зависимости от диаметра озера*

Примеры типичных зависимостей между концентрацией элемента и диаметром озер показаны на рисунке 7.

Для термокарстовых озер континентальной зоны наблюдаются четкие зависимости концентраций микроэлементов от размера озер и ландшафтно-экологических стадий развития, имеющих одинаковые размеры водной поверхности (например, 2-ая стадия и хасырей).

Данные элементного состава озерных вод окрестностей пос. Гыда укладываются в общий тренд зависимостей, характерных для континентальной зоны, однако есть и некоторые особенности. Например, концентрация сурьмы в несколько раз меньше в арктических озерах прибрежной зоны в сравнении с

озерами континентальной части (рис. 7б). В соответствии со значительно менее кислым pH, концентрация типичных нерастворимых элементов, таких как Al и Zr в озерах диаметром менее 100 м значительно меньше в прибрежной зоне в сравнении с континентальной зоной.

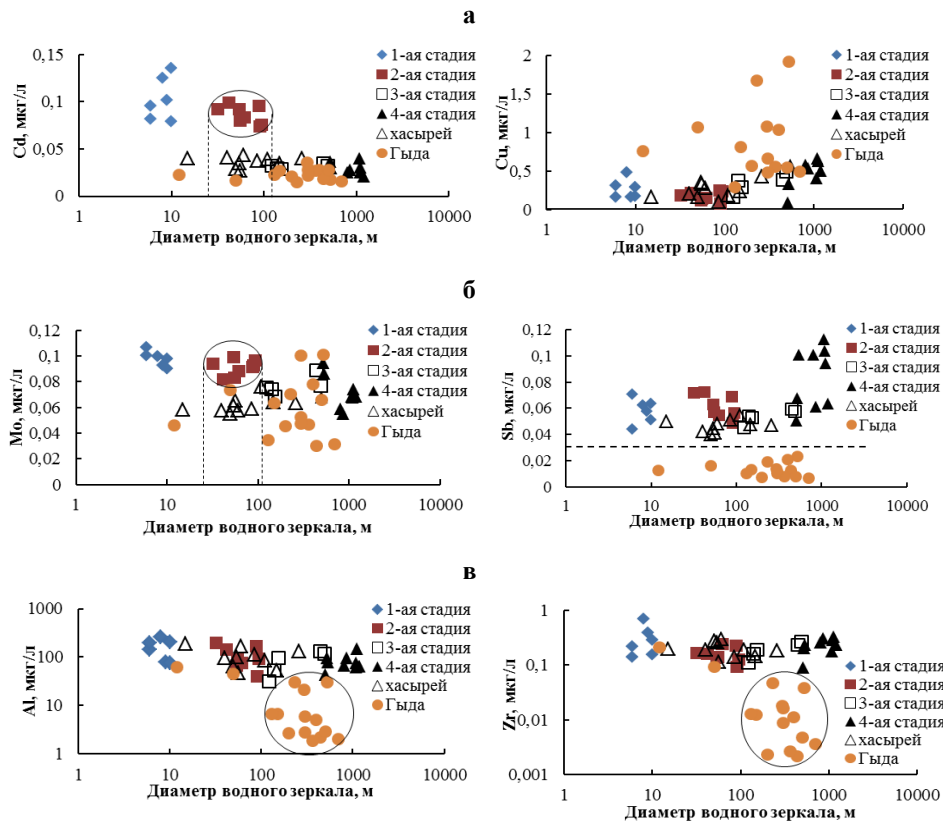


Рис. 7 Примеры концентрации микроэлементов в зависимости от диаметра водного зеркала изученных озер: А - двухвалентные металлы (Cd, Cu), Б - нейтральные молекулы (Mo, Sb,), В - трех- и четырехвалентные гидролизаты (Al, Zr).

Снижение концентрации элементов при увеличении размера водной поверхности озер, характерны для элементов, которые поступают в озерную воду при выщелачивании торфа и разложении растений, а затем активно изымаются из водной толщи при химических и микробиологических процессах без существенного атмосферного или подземного привноса. Это наблюдение может быть верно для всех двухвалентных переходных металлов.

Для выявления специфики химического состава термокарстовых озер в начале их формирования, было рассчитано отношение средних концентраций элементов в озерах первой стадии развития (< 10 м) к среднему значению для всех других стадий, которая показана на рисунке 8. В начале формирования

озера, происходит значительное обогащение ( $\geq 2$  раза) в озерной воде концентраций Fe, Si, Ga, Pb, Cd и нерастворимых трех- и четырехвалентных гидролизатов, которые связаны с POY и Fe. При развитии озер и увеличении их размера, Zn, Ba, Y, Ce и La снижают свои концентрации, в то время как, K, Rb, Se, Li, Cu, и, в меньшей степени Mg, B, Sb увеличивают концентрации. Значительное увеличение K (и его изоморфы Rb) при созревании озер может быть связано с поступлением этих элементов из разлагающихся растений и от развития макрофитов, которые присутствуют на заключительном этапе сукцессионного цикла развития термокарстовых озер. Минимальные изменения в концентрации были записаны для Na, V, Sb, U, Ca и Mn, данные химические элементы выступают в качестве консервативной составляющей термокарстовых озер Западной Сибири.

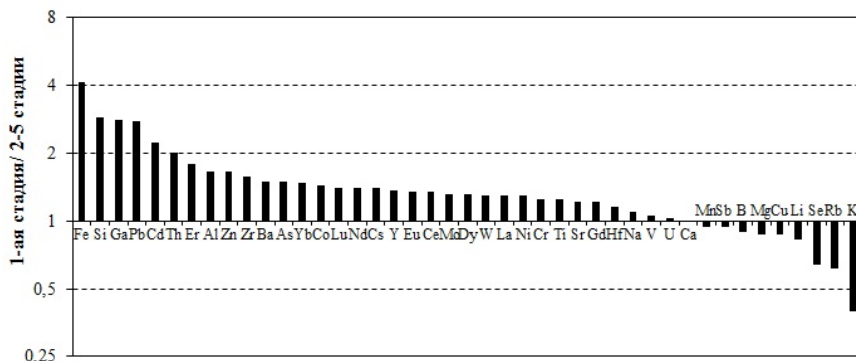


Рис. 8 Отношение концентраций химических элементов в озерах первой стадии развития к среднему значению концентрациям остальных стадий.

*Растворенный органический углерод и концентрации металлов в термокарстовых озерах Западной Сибири на 900 км профиле многолетней мерзлоты*

Все изученные термокарстовые озера разделены на четыре диапазона размеров водного зеркала: термокарстовые депрессии/малые озера меньше 10 м в диаметре; молодые термокарстовые озера менее 100 м в диаметре; озера средних размеров до 500 м в диаметре (доминирующий тип термокарстовых озер в данном регионе); и зрелые озера с диаметром водного зеркала более 500 метров. Проведенный анализ показал, что существуют четыре различных модели концентраций элементов в зависимости от позиции озера на широтном профиле, показанном на рисунке 9: (1) снижение концентрации элементов с юга на север (уменьшение концентрации от 2 до 4 раз POY, Pb, V, Ga, Ba, Sb (рис. 9а); (2) несистематические эволюции концентрации при относительно небольшом изменении на широтном профиле (уменьшение концентрации с юга на север менее чем в 2 раза Si, Fe, Al, As, PЗЭ) (рис. 9б); (3) максимальная концентрация на северной границе распространения прерывистой многолетней мерзлоты (район г. Новый Уренгой) увеличение до 5 раз по сравнению с соседними районами и в 2-3 раза снижение в северной точке профиля (Mn, Co,

Cd, Cs, Zr, Hf, Th) (рис. 9в); и (4) увеличение концентрации от 3 до 10 раз с юга на север (район пос. Гыда) в зависимости от элемента и размера водоема (удельная электропроводность,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Ca, Na, Mg, K, Li, B, Sr, Rb, Mo, W, U, Zn, Cu, Ni и Cr) (рис. 9г).

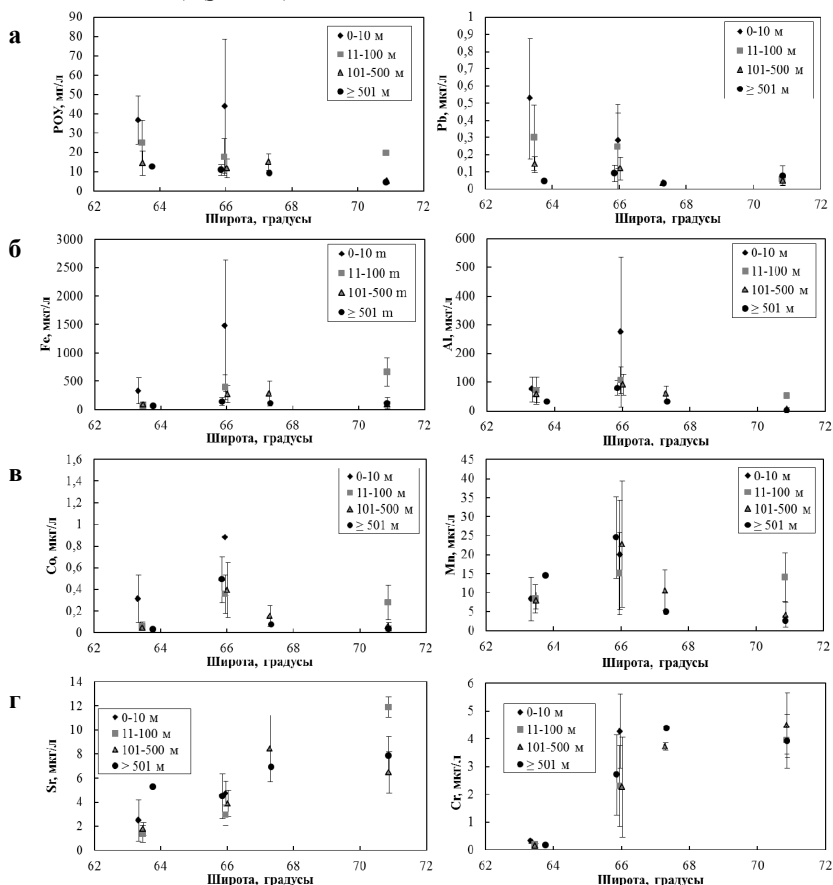


Рис. 9 Концентрации некоторых химических параметров изученных термокарстовых озерах в зависимости от географической широты. Средняя концентрация и стандартное отклонение ( $\pm 2\sigma$ ).

Концентрация PO<sub>4</sub> снижается более чем в три раза от начальной стадии (озера < 10 м) до зрелых термокарстовых озер > 500 м в диаметре (рис. 9а). Вероятно, что при увеличении термокарстовых процессов на севере Западной Сибири увеличится концентрация PO<sub>4</sub> в малых термокарстовых озерах до 300 %.

При приближении к морю, концентрация  $\text{Ca}^{2+}$ , основных катионов и анионов, а также типичных микроэлементов, которыми обогащены морские воды, увеличивается, например, Sr и Mo. Наблюдается выраженное увеличение

концентраций Ni, Cu и Cr на расстоянии около 300 км от крупнейшего промышленного центра русской Арктики (Cu-Ni-Cr, заводов в г. Норильске). Следует отметить, что концентрация Pb уменьшается к северу, это снижение может отражать уменьшение интенсивности выщелачивания свинца из торфа.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что при постепенном нагреве многолетней мерзлоты севера Западной Сибири, концентрация растворенного, но мало биодоступного органического вещества и большинства микроэлементов, которые связаны с органическими и органоминеральными коллоидами увеличится ( $\geq 2$  раза). Элементы, которыми обогащен торф, такие как Pb, V, и Ba, могут увеличить свои концентрации в термокарстовых озерах в 2-3 раза, если произойдет увеличение глубины активного слоя.

## **ВЫВОДЫ**

1. Для термокарстовых озер субарктики Западной Сибири характерно систематическое изменение химического состава воды, от Fe-Si вод в начале формирования озера до Ca-Na-Mg вод в зрелых озерах 4-й стадии. При осушении озера и образовании хасырея происходит увеличение относительного вклада Si, K и Fe.

2. На начальной стадии развития термокарстовых озер, происходит значительное увеличение ( $\geq 2$  раза) в озерной воде концентраций Fe, Si, Ga, Pb, Cd и других элементов связанных с POY и Fe. При развитии озер и увеличении их размера, Zn, Ba, Y, Ce и La снижают свои концентрации, в то время как, K, Rb, Se, Li, Cu, и, в меньшей степени Mg, B, Sb увеличивают концентрации, что может являться индикатором сукцессионного цикла термокарстовых озер, связанного с новейшей динамикой климата.

3. При усилении термокарстовых процессов на территории Западной Сибири можно прогнозировать увеличение концентрации в водах термокарстовых озер растворенного, но мало биодоступного органического углерода и большинства микроэлементов, которые присутствуют в форме органических и органоминеральных коллоидов. Средний рост концентрация может варьироваться от 200 до 400 %.

4. Изученные колонки донных отложений характеризуются повышенным содержанием органического углерода и мелкодисперсностью, что обуславливает их высокую сорбционную ёмкость и высокие показатели корреляции концентраций химических элементов связанных с органическим углеродом.

5. Изученные виды макрофитов проявляют различную аккумуляционную способность, что объясняется их видоспецифичностью, а также позволяет рекомендовать их в качестве фитоиндикаторов для ряда тяжелых металлов, таких как As, Ni, Cu, Pb, Sb, Co.

6. В макрофитах термокарстовых озер севера Западной Сибири активно накапливаются некоторые химические элементы (макроэлементы (Na, Mg, Ca), тяжелые металлы (Ni, Cu, Zn), а также В и Мо) по сравнению с донными отложениями.

*Статьи, опубликованные в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:*

1. Kirpotin S., Polishchuk Y., Bryksina N., Sugaipova A., Kouraev A., Zakharova E., Pokrovsky O., Shirokova L., Kolmakova M., **Manassypov R.** & Dupre B. West Siberian palsa peatlands: distribution, typology, cyclic development, present-day climate-driven changes, seasonal hydrology and impact on CO<sub>2</sub> cycle // International Journal of Environmental Studies. 2011. Vol. 68, № 5. P. 603–623. – 1,26 / 0,12 п.л.

2. **Манасыпов Р.М.**, Кирпотин С.Н., Покровский О.С., Широкова Л.С. Особенности элементного состава озерных вод и макрофитов термокарстовых экосистем субарктики Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 3(19). С. 186–198. – 0,58 / 0,4 п.л.

*Статьи в зарубежных научных изданиях:*

3. Kolmakova M.V., Kouraev A.V., Zakharova E.A., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., **Manassypov R.M.**, Mognard N.M. Hydrological and hydrochemical processes in the Western Siberian plain from remote sensing and field observations // EGU Leonardo conference on the hydrological cycle 2010. Luxembourg, 10-12 November 2010. – Luxembourg, 2010. – P. 115. – 0,09 / 0,02 п.л.

4. **Manassypov R.M.**, Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Hydrochemical composition of thermokarst lake waters in the permafrost zone of western Siberia within the context of climate change // The Cryosphere Discussions. 2013. Vol. 7, № 6. P. 5333–5387. – 2,08 / 1,4 п.л. – DOI: 10.5194/tcd-7-5333-2013.

*Статьи в других научных изданиях:*

5. Kirpotin S., Polishchuk Y., Pokrovsky O., Kouraev A., Bryksina N., Sugaipova A., Zakharova E., Shirokova L., Kolmakova M., Manassypov R., Dupre B. Vegetation Response on Climatic Changes in West-Siberian North // Proceedings of International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010, 5 July – 11 July 2010. – Tomsk, 2010. – P. 43. – 0,12 / 0,03 п.л.

6. **Манасыпов Р.М.** Термокарстовые озера субарктики Западной Сибири в глобальном переносе химических элементов // Научное наследие В.И. Вернадского и современные проблемы науки: материалы I Всероссийской научно-практической конференции. – Чебоксары, 2010. – С. 54–55. – 0,15 п.л.

7. **Манасыпов Р.М.** Растворенный органический углерод в водах термокарстовых озер Западной Сибири // Современные проблемы геохимии: материалы конференции молодых ученых (Иркутск, 12–17 сентября 2011 г.). – Иркутск: Издательство Института географии СО РАН, 2011. С. 179–180. – 0,15 п.л.

8. **Манасыпов Р.М.**, Кирпотин С.Н., Покровский О.С. Биогеохимические особенности озерно-болотных экосистем субарктики Западной Сибири // Современные проблемы генезиса, географии и картографии почв: сборник материалов V Всероссийской конференции с международным участием, Томск, 1–5 октября 2011 г. – Томск: ООО «Копи-М», 2011. – С. 47–48. – 0,16 / 0,11 п.л.

9. **Манасыпов Р.М.**, Кирпотин С.Н., Покровский О.С. Биогеохимические особенности озер субарктики Западной Сибири в связи с климатическими изменениями // Российско-немецкое сотрудничество в области экологии арктических экосистем: результаты и перспективы: сборник материалов научно-практического семинара, Казань, 21–24 ноября 2011 г. – Казань: Казан. ун-т, 2011. С. 23–24. – 0,08 / 0,04 п.л.

10. **Манасыпов Р.М.** Некоторые биогеохимические особенности озерных термокарстовых экосистем субарктики Западной Сибири при климатических изменениях // Вестник Казахского национального университета. Серия экологическая. 2012. № 1(33). С. 194–197. – 0,27 п.л.

11. **Манасыпов Р.М.**, Кирпотин С.Н., Покровский О.С. Изменение элементного состава вод термокарстовых озер субарктики Западной Сибири в контексте современной динамики ландшафта // Биогеоценология и ландшафтная экология: итоги и перспективы: материалы IV международной конференции, посвященной памяти Ю.А. Львова, Томск, 28–30 ноября 2012 г. – Томск: Томский государственный университет, 2012. С. 382–386. – 0,25 / 0,22 п.л.

Отпечатано в учебно-производственной типографии ТГУ.  
Томск, пр. Ленина, 66. Телефон: 51-37-36.  
Тираж 100 экз.