

УДК 551.465.7

Content of Metals in *Phragmites australis* Trin. ex Steud and *Potamogeton pectinatus* L. from Water Bodies of Different Salinity

**Elena A. Ivanova^{*a,b}, Olesya V. Anishchenko^{a,b},
Ivan V. Zuev^a and Anton P. Avramov^a**

^aSiberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

^bInstitute of Biophysics of SB RAS

50/50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

Received 06.05.2015, received in revised form 11.07.2015, accepted 22.06.2015

*Metals were determined in two species of macrophytes *Phragmites australis* Trin. ex Steud and *Potamogeton pectinatus* L. grown in lakes of different salinity, using emission spectrometer with inductively coupled plasma. Principal component analysis revealed that the total metal content is influenced by species of macrophytes and environmental conditions (in particular water chemistry). Both species of macrophytes from freshwater reservoir Bugach were characterized by higher concentrations of Fe, Al, Ni, V and Co in comparison with the same species from brackish lakes. However, there were no significant differences in content of these metals between samples of macrophytes taken in desalinated and saltwater parts of Shira Lake. In some cases, metal content of samples collected in different years at the same place were significantly different. It was observed for plants of *Ph. australis* collected in brackish station of Shira Lake, and plants of *P. pectinatus* from Lake Shunet. It was found that the highest total content of most metals is typical for *P. pectinatus*.*

Keywords: macroelements, microelements, metals, macrophytes, reservoir, brackish lake, salinity.

DOI: 10.17516/1997-1389-2015-8-3-347-361.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: elenivalg@mail.ru

Содержание металлов в *Phragmites australis* Trin. ex Steud и *Potamogeton pectinatus* L. из водоемов разной минерализации

Е.А. Иванова^{а,б*}, О.В. Анищенко^{а,б},
И.В. Зуев^а, А.П. Аврамов^а

^аСибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

^бИнститут биофизики СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50

Металлы определяли в двух видах макрофитов – *Phragmites australis* Trin. ex Steud и *Potamogeton pectinatus* L., произрастающих в водоемах с разной соленостью, с помощью эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой. Анализ результатов методом главных компонент показал, что на валовое содержание металлов влияет вид макрофитов и условия окружающей среды, в частности химический состав воды. Оба вида макрофитов из пресноводного водохранилища Бугач отличались более высокими концентрациями железа, алюминия, никеля, ванадия и кобальта по сравнению с теми же видами макрофитов, собранными в солоноватоводных озерах. Однако для макрофитов из оз. Ши́ра, отобранных в опресненной и солоноватоводной частях озера, расхождений в содержании данных металлов не выявлено. В ряде случаев пробы из одной точки, но собранные в разные годы имели существенные различия – это наблюдалось для растений тростника из солоноватоводной станции оз. Ши́ра, и растений рдеста из оз. Шунет. Было установлено, что наиболее высокое валовое содержание большинства металлов характерно для *P. pectinatus*.

Ключевые слова: макроэлементы, микроэлементы, металлы, макрофиты, водохранилище, солоноватоводные озера, минерализация.

Введение

Высшие водные растения (макрофиты) представляют начальное звено в круговороте веществ и энергии как первичные продуценты органического вещества, вовлечены в трофические сети, играют огромную роль в поддержании сложившегося естественного равновесия в водоемах и в природных ландшафтах в целом. Достоверно известно, что высшие водные растения способны накапливать в своих

тканях большое количество тяжелых металлов, содержание которых сильно варьирует в разных видах макрофитов и в зависимости от условий произрастания. Биологическая роль химических элементов в растениях разная, чаще всего выделяют две большие группы металлов: макроэлементы и микроэлементы (Мур, Рамамурти, 1987; Лукина, Смирнова, 1988). Благодаря способности накапливать некоторые металлы в тканях растений макро-

фиты используются как природные фильтры для удаления металлов из водных экосистем (Dunbabin, Bowmer, 1992; Kumar et al., 2008; Nikolić et al., 2014 и др.). С другой стороны, высшие водные растения известны как объекты питания гидробионтов, представляя начальное звено многих трофических цепей (Гаевская, 1966), в том числе и в водоемах с разной соленостью воды. В данной статье рассматривается вопрос о том, что влияет на валовое содержание металлов в макрофитах: вид растений или окружающие условия, в которых они произрастают.

Материалы и методы

Работы проводили в 2012-2013 гг. на трех водоемах: пресноводном водохранилище Бугач, солоноватоводных озерах Шира и Шунет, расположенных в Красноярском крае и Республике Хакасия (рис. 1).

Водохранилище Бугач (56°03' с.ш., 92°44' в.д.) – небольшой пресноводный водоем, образован на р. Бугач (вторичном притоке Енисея) и расположен в окрестностях Красноярска, в лесостепной местности, частично занятой пастбищами и полями, его огибает оживленная автомагистраль. В него впадают ручьи Пяткова и Каракуша, сток из водохранилища осуществляется через плотину. Водоем имеет сложную конфигурацию, площадь около 0,32 км², максимальная глубина 7 м, средняя глубина водоема около 2-3 м. Водохранилище, в котором наблюдается ежегодное продолжительное летнее «цветение» воды цианопрокариотами, слабопрозрачное, хорошо перемешиваемое, нестратифицированное по температуре, но стратифицированное по содержанию кислорода и рН (рН=7,7-9,5) (Гладышев и др., 2001). Воды водохранилища относятся к гидрокарбонатному классу, водо-

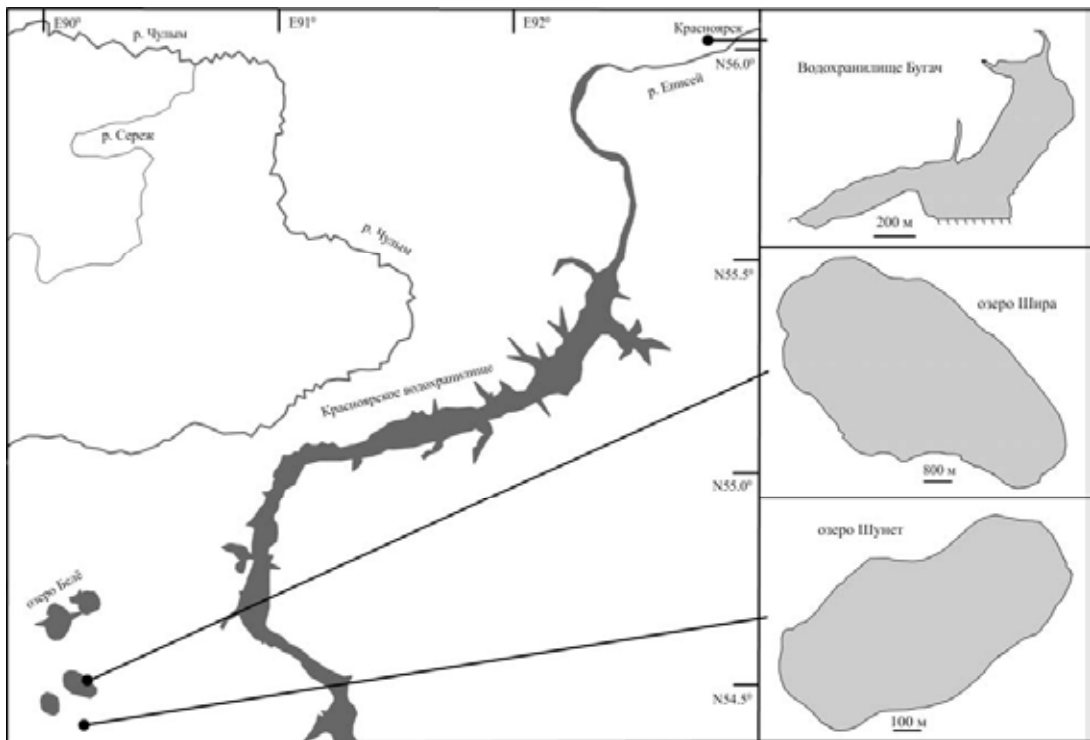


Рис. 1. Карта-схема расположения водоемов

ем характеризуется средней минерализацией (Мучкина, Новикова, 2004).

Бессточное степное оз. Ши́ра расположено в 17 км к востоку от пос. Ши́ра (Республика Хакасия). В южную часть озера впадает р. Сон. Морфометрические параметры озера следующие: площадь водного зеркала 35,9 км², длина 9,35 км, максимальная ширина 5,3 км, длина береговой линии 24,5 км, максимальная глубина из года в год варьирует и превышает 24 м, средняя глубина 11 м. Вода по химическому составу сульфатно-хлоридно-натриево-магниевая. Реакция воды щелочная (pH = 8,9-9,2). Характерной особенностью воды озера является низкое содержание катионов кальция (Жемчужина Хакасии..., 1997; Природный комплекс..., 2011). Соленость воды в эпилимнионе озера (верхние 5-6 м водного столба) во время стратификации летом составляет около 14-15 г/л, в более глубоких слоях воды 18-19 г/л (Rogozin et al., 2011). Пробы макрофитов отбирали на двух станциях: станция 1 (54°29' с.ш., 90°11' в.д., соленая часть озера) – в литорали озера, 1 км южнее курортной зоны п. Жемчужный, и станция 2 – устье р. Сон (54°28' с.ш., 90°15' в.д., опресненная часть озера).

Степное оз. Шунет (54°25' с.ш., 90°14' в.д.) расположено в 10 км юго-западнее пос. Жемчужный. Озеро бессточное, на южном берегу в него впадает небольшой пресноводный ключ. Площадь водного зеркала озера составляет 0,46 км², длина береговой линии 2,9 км, глубина около 3 м, абсолютная отметка уреза воды 418,3 м. Вода озера отнесена к среднеминерализованным сульфатно-хлоридно-натриево-магниевым с щелочной реакцией (pH=8,4). Для озера характерен непостоянный гидрологический режим (Жемчужина Хакасии..., 1997; Природный комплекс..., 2011).

Металлы определяли в двух видах макрофитов, произрастающих во всех водоемах:

гелофит *Phragmites australis* Trin. ex Steud (тростник южный) и гидрофит *Potamogeton pectinatus* L. (рдест гребенчатый). Растения собирали в конце июля – начале августа в период максимального роста в наиболее типичных участках фитоценозов в трехкратной повторности. Сбор растений проводили методом укосов фитомассы с учетных площадок с помощью рамки размером 50x50 см, срезая растения на уровне грунта (Катанская, 1981). Укосы разбирали по видам растений. Для удаления частиц грунта, животных и остатков растений промывали проточной и дистиллированной водой. Затем все части растения измельчали с помощью электрической мельницы и высушивали в сушильном шкафу при 105 °С до постоянного веса. Из гомогенизированной растительной массы брали навеску (1 г) на анализ (Никаноров, Жулидов, 1991).

Навески образцов минерализовали методом мокрого сжигания в смеси азотной и хлорной кислот (1:1). Определение содержания металлов (Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Mg, Na, Ni, Pb, Sr, Sb, Tl, Ti, V, Zn) в исследуемых образцах растений проводили с помощью эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific, Великобритания) согласно методикам (EPA 200.7 Trace elements in water, solids, and biosolids by inductively coupled plasma (33 элемента); ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах (почва, компосты, кеки, осадки сточных вод, пробы растительного происхождения) методами спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (41 элемент)). Калибровка прибора выполнена с использованием многокомпонентных стандартов для ИСП (ICP multi-element standard solution IV and XVI, Merck, Germany). В качестве внутреннего стандарта применяли скандий (5 мг/л) в

виде Sc_2O_3 , ионизационный буфер (CsCl) добавляли в раствор Sc_2O_3 . При приготовлении калибровочных стандартов использовали деионизированную воду (18 МОм), добавляли 10 мл/л концентрированной соляной кислоты (осч, ООО «Сигма Тэк», г. Химки). В качестве фона в калибровочные растворы вводили матричные элементы (K, Na, Ca и Mg) в средних концентрациях, характерных для растений. С каждой партией проб готовили холостой образец – смесь хлорной и азотной кислот (1:1), который выпаривали и разводили деионизированной водой, как и исследуемые пробы. Контроль качества анализа проводился с использованием ГСО 8869-2007 травяной муки злаковой. Валовое содержание металлов в растительных образцах проводили в аналитической лаборатории Института биофизики СО РАН.

Для выяснения характера изменчивости распределения металлов в макрофитах в программе Statistica 10 (Statsoft.Inc.) был проведен анализ главных компонент (PCA), основанный на корреляционной матрице 18 элементов (Na, K, Ca, Fe, Mg, Cu, Mn, Zn, Pb, Al, Ti, Sr, Mo, Ni, Cd, V, Co, Cr). Металлы, имеющие следовые концентрации, в анализ не включены. Результаты представлены в виде диаграмм рассеяния отдельных проб макрофитов в пространстве двух первых главных компонент (ГК 1 и ГК 2) и таблицы факторных нагрузок по каждому металлу.

Результаты

Валовое содержание металлов в образцах тростника южного, собранных в 2012 и 2013 гг. в трех разных по солености водоемах, значительно варьировало. *Ph. australis* относится к гелофитам– экологической группе растений, у которых практически вся надземная масса кроме нижней части стебля находится над водой. *P. pectinatus* – гидрофит, все части

которого погружены в воду. Таким образом, логично предположить, что концентрация многих металлов в разных видах должна отличаться.

Валовое содержание K в пробах *Ph. australis*, собранных в 2012 г., варьировало в зависимости от типа водоема от 4388 до 9946 мг/кг сухой массы, максимум был зарегистрирован в водохранилище Бугач. В 2013 г. тенденция распределения концентрации калия в образцах тростника осталась прежней, хотя его валовое содержание выросло на 40 – 100 % по сравнению с предыдущим годом (табл. 1).

В трех изучаемых водоемах концентрация Ca в растениях тростника также была высокой, но в несколько раз ниже содержания K. Наибольшее значение Ca выявлено в 2012 г. в пробах *Ph. australis* из водохранилища Бугач, наименьшая их концентрация обнаружена в пробах растений, собранных в оз. Шира. Валовое содержание Zn значительно варьировало как в растениях из водоемов разных типов, так и в пробах, отобранных в разные годы.

Распределение содержания Na и Mg в пробах *Ph. australis* из разных водоемов имело сходные черты в оба года наблюдения. Самые высокие значения концентраций обоих элементов зарегистрированы в 2012 г. в оз. Шира на станции 1 и составили 7266 мг/кг для Na и 2797 мг/кг для Mg. Низкое валовое содержание Mn характерно для растений из оз. Шунет. Концентрации Mo в образцах тростника были низкие и незначительно варьировали по годам.

Валовое содержание Fe в образцах *Ph. australis* зависит от года отбора проб и солености водоема. Так, минимум зарегистрирован в наиболее соленом оз. Шунет и составил 51-52 мг/кг, максимум – в пресноводном водохранилище Бугач – 115,68 и 79,72 мг/кг в 2012 и 2013 гг. соответственно. Хотя самая высокая

Таблица 1. Валовое содержание металлов (мг/кг сухой массы) в *Rhagmites australis* из водохранилища Бугач, озер Шири (1 – станция 1; 2 – станция 2) и Шунет в 2012-2013 гг. (среднее арифметическое и его ошибка, N=3)

Металл	2012			2013			
	Шири 1	Шири 2	Бугач	Шири 1	Шири 2	Бугач	Шунет
K	4388,7±378,4	6354,8±560,9	9946,9±601,6	11470,8±665,5	10723,3±297,0	13522,5±534,0	8706,7±464,1
Na	7266,7±428,8	3466,5±272,9	1242,3±58,0	2508,2±243,2	2647,0±137,8	1011,7±46,9	2935,4±371,3
Mg	2797,3±70,2	1816,3±132,1	1557,9±129,9	1838,4±147,9	2061,4±140,1	1349,3±64,6	2661,7±35,9
Ca	1071,8±48,9	1024,5±46,9	2851,7±161,7	1620,5±79,6	1305,6±135,3	2660,4±133,6	2055,4±123,3
Fe	149,25±7,46	65,28±4,25	115,68±18,14	59,59±5,63	67,31±2,51	79,72±14,72	51,09±8,19
Cu	2,91±0,30	1,76±0,06	2,79±0,16	4,66±0,65	3,62±0,05	1,82±0,08	3,02 ±0,31
Mn	159,3±18,1	114,8±5,6	220,7±6,4	148,3±22,8	215,9±18,0	194,3±9,9	123,4±21,9
Zn	6,29±0,32	15,88±1,38	24,23±8,14	12,97±0,41	35,35±2,63	9,05±0,26	23,39±2,19
Mo	0,31±0,03	0,46±0,06	0,58±0,18	0,36±0,04	0,33±0,01	0,21±0,01	0,40±0,03
Pb	0,17±0,02	0,029±0,01	0,068±0,03	0,07±0,03	0,11±0,02	0,12±0,05	0,16±0,02
Co	0,29±0,02	0,075±0,01	0,24±0,04	0,06±0,003	0,04±0,001	0,08±0,01	0,04±0,01
Al	97,5±8,89	18,55±0,49	92,30±22,04	12,26±3,41	8,35±0,33	98,34±16,1	17,42±1,28
Ti	5,72±0,54	1,14±0,09	2,4 ±1,10	2,86±0,27	2,46±0,05	3,91±1,51	0,46±0,36
Cr	3,12±0,23	2,43±0,46	4,77±0,42	1,56±0,23	2,07±0,27	1,71±0,19	1,43±0,08
Sr	47,24±1,86	89,33±0,86	66,88±6,64	120,59±14,36	65,26±3,59	42,69±2,39	148,95±10,21
Ni	2,87±0,08	2,03±0,28	3,33±0,23	1,30±0,10	1,08±0,10	1,42±0,09	1,21±0,21
V	0,27±0,01	0,10±0,01	0,32±0,03	0,04±0,01	0,04±0,002	0,19±0,03	0,09±0,02
Cd	0,041 ± 0,01	0,075±0,02	0,039±0,01	0,01±0,001	0,02±0,01	0,01±0,001	0,01±0,002

концентрация железа отмечена в пробах, отобранных на станции 1 озера Ши́ра. Валовое содержание Cu изменялось незначительно и варьировало от 1,6 до 4,66 мг/кг во всех водоемах на протяжении двух лет.

В течение двух лет концентрации Al в *Ph. australis* были достаточно высоки. Максимум величин (92,3–98,34 мг/кг) зарегистрирован в водохранилище Бугач; минимум отмечен в 2013 г. в оз. Ши́ра (станция 2) и составил 8,35 мг/кг. Необычно низкими для растений были концентрации Ti и изменялись от 0,46 до 5,72 мг/кг. В образцах тростника из оз. Шунет по сравнению с другими водоемами валовое содержание Ti было практически постоянным.

На протяжении двух лет в пробах *Ph. australis* отмечены высокие значения валового содержания Sr: минимальная концентрация Sr обнаружена в 2012 г. в образцах растений из оз. Ши́ра (станция 1) и в 2013 г. в образцах из водохранилища Бугач, а максимальные – в 2013 г. в пробах из оз. Шунет.

Низкие концентрации в пробах *Ph. australis* отмечены для Pb: в 2012 г. минимальное значение 0,029 мг/кг было на станции 2 оз. Ши́ра (условно опресненный участок), максимальное 0,83 мг/кг в этом же году – в оз. Шунет. В 2013 г. значения по водоемам колебались незначительно (0,07–0,16 мг/кг).

Валовое содержание таких элементов, как Co, Ni, Cr, Cd и V, в образцах *Ph. australis* было невысоким. Концентрации всех металлов в 2012 г. были выше более чем в 2 раза по сравнению с 2013 г. Самые низкие значения отмечены для Cd (0,01–0,07 мг/кг), более высокие значения – для Cr (1,43–4,77 мг/кг) и Ni (1,08 – 3,33 мг/кг) (табл. 1).

Содержание K в пробах *P. pectinatus* за два года варьировало в пределах от 12 958 до 26 156 мг/кг сухой массы (табл. 2). Минимальное и максимальное значения были

зарегистрированы в одной и той же точке отбора проб на оз. Ши́ра в 2012 и 2013 гг. соответственно. Минимальные концентрации Na в пробах рдеста (6901 мг/кг) выявлены в 2012 г. в водохранилище Бугач, а максимальные (31 675 мг/кг) – в 2013 г. в оз. Ши́ра (устье р. Сон). Валовое содержание Ca в рдесте гребенчатом из пресноводного водоема Бугач в 20 раз превышало содержание элемента в образцах из соленых водоемов. Распределение концентрации Mg по образцам рдеста имело обратную зависимость: в пробах из соленых водоемов содержание Mg на 70 % выше, чем из пресноводного водохранилища.

Концентрация Fe в растениях *P. pectinatus* для всех водоемов в 2012 г. была выше (537 – 3620 мг/кг сухой массы), чем в 2013 г. (202 – 1959 мг/кг сухой массы). В целом однозначной зависимости содержания Fe в рдесте гребенчатом от типа водоема не обнаружено. Содержание Cu, Zn и Mo в образцах рдеста на протяжении двух лет для всех типов водоемов изменялось незначительно, а их распределение было схожим. Концентрация Mn в образцах *P. pectinatus* сильно варьировала и не зависела от типа водоема и года отбора проб. Содержание Al в растениях рдеста изменялось значительно (от 34,7 до 4593,95 мг/кг). Максимум был обнаружен в водохранилище Бугач в 2012 г. и составил 4593,95 мг/кг, в 2013 г. – 3088,91 мг/кг. Концентрация Ti во всех образцах рдеста сильно колебалась – от 3,71 до 275,65 мг/кг. Минимальная концентрация Ti обнаружена в 2012 г. в растениях *P. pectinatus* из оз. Ши́ра (станция 1), максимальная – в образцах из оз. Шунет.

Валовое содержание Pb и Co в образцах *P. pectinatus* в 2013 г. во всех исследуемых водоемах была в 2–3 раза ниже, чем концентрации этих элементов в 2012 г. Распределение валового содержания Cr и Ni в образцах рдеста гребенчатого носило неоднозначный

Таблица 2. Валовое содержание металлов (мг/кг сухой массы) в *Rotatogeton resipitans* из водохранилища Бугач, озер Шира (1 – станция 1; 2 – станция 2) и Шунет в 2012-2013 гг. (среднее арифметическое и его ошибка, N=3)

Металл	2012			2013				
	Шира 1	Шира 2	Бугач	Шунет	Шира 1	Шира 2	Бугач	Шунет
K	12958,7±446,5	13412,6±780,9	20489,6±263,0	15467,6±743,8	26156,7±1669,2	19169,2±523,8	17150,0±330,1	20455,0±627,4
Na	19389,6±867,6	18807,0±841,4	6901,5±70,3	18204,9±232,8	29466,7±388,1	31675,0±423,4	7405,8±247,6	29758,3±1215,7
Mg	17628,7±203,9	17573,1±532,3	10625,8±676,5	17855,5±209,9	14307,5±678,4	13821,7±171,9	8814,2±410,2	17133,3±211,1
Ca	2789,4±120,3	2773,4±347,0	39497,9±4980,4	4192,3±45,6	2054,5±190,4	1976,5 ±20,1	37475±4512,9	2961,7±67,7
Fe	537,2±59,8	1198,4±109,8	2580,2±208,4	3620,2±627,7	365,8±44,9	202,3±8,8	1959,8±210,5	535,6±43,6
Cu	2,11±0,29	1,18±0,02	4,33±0,21	2,42±0,12	2,22±0,21	1,4±0,13	3,09±0,18	2,12±0,01
Mn	354,9±23,0	1285,8±69,4	492,5±73,2	182,7±10,6	181,1±44,1	350,3±4,1	119,7±4,3	277,6±16,0
Zn	13,33±0,61	27,04±0,7	29,06±0,77	21,02±2,94	13,83±0,29	21,51±1,77	14,63±1,11	21,07±1,76
Mo	0,56±0,09	0,10±0,05	2,69±0,88	1,022±0,16	0,50±0,11	0,61±0,06	0,84±0,02	1,37±0,18
Pb	1,82±0,24	3,26±0,39	0,17±0,08	1,18±0,13	0,61±0,12	0,67±0,05	0,12±0,05	0,85±0,05
Co	1,28±0,12	1,63±0,08	2,18±0,14	1,68±0,09	0,49±0,04	0,32±0,02	1,03±0,07	0,63±0,01
Al	466,6±45,1	220,7±42,7	4593,9±185,5	542,1±14,5	245,9±50,5	34,7±3,7	3088,9±352,6	126,0±16,1
Ti	3,71±2,86	25,85±2,5	112,99±23,72	275,65±38,96	25,43 ± 5,19	6,09±0,23	92,69±11,67	19,04±1,76
Cr	6,59±1,53	2,21±0,43	5,74±0,32	21,72±2,07	7,85±2,53	0,67±0,07	6,65±1,01	1,64±0,13
Sr	230,62±2,54	279,79±17,82	899,62±91,32	287,10±2,13	134,16±3,72	127,00±1,17	603,66±46,89	200,13±2,92
Ni	5,59±1,13	2,59±0,11	5,71±0,25	8,314±0,32	3,85±1,22	0,81±0,05	5,63±0,66	1,41±0,08
V	2,40±0,48	1,40±0,22	8,65±0,38	9,18±0,76	0,77±0,14	0,22±0,004	5,73±0,28	1,44±0,08
Cd	0,09±0,01	0,13±0,003	0,11±0,004	0,22±0,01	0,03±0,002	0,03±0,002	0,06±0,004	0,06±0,001

характер: в 2012 г. высокие значения Sr и Ni зарегистрированы в пробах из оз. Шунет, а в 2013 г. – в растениях из оз. Шири и водохранилища Бугач. Валовое содержание Sr за два года изменялось незначительно, отличие было в пробах *P. pectinatus* из водохранилища Бугач, где концентрации Sr превышали остальные показатели более чем в 3 раза. Концентрации Cd во всех образцах рдеста невысоки и варьировали от 0,03 до 0,22 мг/кг. Амплитуда содержания V в растениях рдеста гребенчатого была значительной, его содержание изменялось от 0,22-0,77 мг/кг сухой массы в оз. Шири (2013 г.) до 9,18 мг/кг сухой массы – в оз. Шунет (2012 г.) (табл. 2).

Обсуждение результатов

Как известно, гидрофиты обладают наибольшей аккумулирующей способностью и могут поглощать металлы как из водной среды, так и из донных отложений. Гелофиты такой способностью обладают в меньшей степени (Munteanu et al., 2005). Однако прибрежно-водные растения, с одной стороны, поглощают питательные элементы из воздуха, в котором объемная концентрация тяжелых металлов существенно ниже, чем в воде, а с другой – выводят часть аккумулированного в биомассе металла с транспирационной водой (Лукина, Смирнова, 1988). Таким образом, общих закономерностей в содержании металлов в растениях разных экологических групп до сих пор не обнаружено.

Валовое содержание металлов, обнаруженных в растениях *P. pectinatus*, превосходило содержание металлов в растениях *Ph. australis* от двух до десятков раз. Среди макроэлементов и жизненно необходимых микроэлементов высокое содержание и наибольшая разница у двух видов макрофитов была выявлена в содержании K, Na, Ca, Mg, Mn и Fe. Это обусловлено биологической ро-

лью данных элементов в растениях. Калий и натрий являются ключевыми элементами транспорта вещества через мембраны, они запускают K-Na-насос, ответственный за сохранение электрического потенциала на мембранах. В клетке также существует кальциевый насос, ответственный за попадание вещества в клетку с помощью облегченной диффузии. Марганец является катализатором в процессах дыхания и усвоения нитратов. Показано, что марганец при нитратном питании выступает в роли восстановителя, а при аммиачном – как окислитель. Он необходим для поддержания структуры хлоропластов, способствует оттоку сахаров из листьев; является кофактором ряда ферментов цикла Кребса, нитратредуктазы, РНК-полимеразы, ИУК-оксидазы и др. Магний входит в состав хлорофилла, что определяет его важное значение в жизни растений. Он участвует в углеводном обмене, действии ферментов и в образовании плодов (Власюк, Климовицкая, 1969).

Кальций вместе с магнием помогает в строительстве клеточной стенки растений, составляя основу срединных пластинок клеток растений, способствует целостности клеточных мембран и водоудерживающей способности протоплазмы, играет важную роль в фотосинтезе и передвижении углеводов, в процессах усвоения азота растениями. Железо также играет значительную роль в метаболизме растений: входит в состав ферментов, участвует в синтезе хлорофилла, в процессах газообмена и т.д. (Медведев, 2004).

Результаты исследования показали, что содержания K и Ca значительно выше в образцах растений из пресноводного водоема. Однако значения валового содержания кальция, железа и магния в растениях *Ph. australis* в целом совпадают с данными, полученными в других водоемах, например в оз. Бошково, Доминики, Велки (Западная Польша)

(Szymanowska et al., 1999). Поступление этих элементов в растения и воду водохранилища Бугач можно объяснить высокими концентрациями К, Na, Ca, Mg, Al, Fe, которые в почвах Красноярской лесостепи определяются минеральным составом залегающих пород, представленных преимущественно гранитами, а также серыми песчаниками, мергелями и известняками. Химический состав этих пород включает алюмосиликаты калия, натрия, кальция, железа, магния, оксид кремния и карбонат кальция (Булгаков и др., 1981; Спицына, 2005).

Сравнительный анализ показал, что содержание К и Са в растениях рдеста гребенчатого на порядок выше, чем у тростника южного. Такая же тенденция характерна для других металлов – Al, Ti и Sr. Обращает на себя внимание факт высокого содержания Sr в растениях *P. pectinatus*. Его валовое содержание у рдеста гребенчатого изменялось от 127,0 до 899,6 мг/кг сухой массы, в то время как у *Ph. australis* — от 42,69 до 148,9 мг/кг сухой массы (табл. 1, 2). Известно, что на листьях и стеблях гидрофитов часто образуется органоминеральная пленка или инкрустации, адсорбирующие такие элементы, как Ca, Fe, Al, Ti, Sr и др. (Лукина, Смирнова, 1988; Ivanova et al., 2012).

Валовое содержание Na и Mg, наоборот, выше было в образцах макрофитов из солоноватоводных оз. Ши́ра и Шунет, причем валовое содержание Na и Mg в растениях рдестов было также на порядок выше, чем в растениях тростника. Содержание химических элементов в почвах Ширинской степи Хакасии определяется литологией подстилающих девонских и карбоновых пород, представленных, как правило, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, иногда гравелитами, доломитами, алевролитами и аргиллитами с тонкими прослойками песчаников, мергелей, а также

водорослевых и брекчевидных известняков (Кулижский, Радионова, 2012). В то же время концентрации основных катионов в воде оз. Ши́ра очень высоки: Na (2880-5000 мг/л), Mg (954-1328 мг/л), К (35,7-54 мг/л) Са (48-63 мг/л) (Kalacheva et al., 2002). Высокое содержание Na, Ca и Mg в воде может способствовать формированию органоминеральной пленки на листьях рдестов.

Если концентрации таких элементов, как Cu, Zn, Pb, Ni, Cd и Co, сравнить с литературными данными, то значения, полученные нами на водоемах Бугач, Ши́ра и Шунет в двух видах макрофитов, находятся в пределах варьирования концентраций металлов у макрофитов из канадского оз. Сен-Пьер (St-Cyr et al., 1994), греческого озера Керкини Лэйк (Sawidis et al., 1995) и уже упоминавшихся выше озер Западной Польши (Szymanowska et al., 1999). Хром – единственный элемент, концентрации которого в наших образцах превышают значения, обнаруженные в литературе: для макрофитов канадских и польских озер валовое содержание Cr колебалось в пределах 1,1-1,68 мг/кг сухой массы, в наших водоемах – 1,43- 21,72 мг/кг сухой массы. Таким образом, остается открытым вопрос о том, какой фактор больше влияет на валовое содержание металлов в растении: адсорбирующая способность растения (вид растения) или окружающие условия (тип водоема, включающий степень минерализации, химический состав воды и т.д.).

Анализ данных методом главных компонент может помочь ответить на этот вопрос. Анализ результатов распределения всех образцов растений, включающих пробы *Ph. australis* и *P. pectinatus* из разных водоемов, в пространстве двух главных компонент, в совокупности объясняющих 64 % изменчивости, показывает, что вариабельность в содержании металлов в образцах тростника зна-

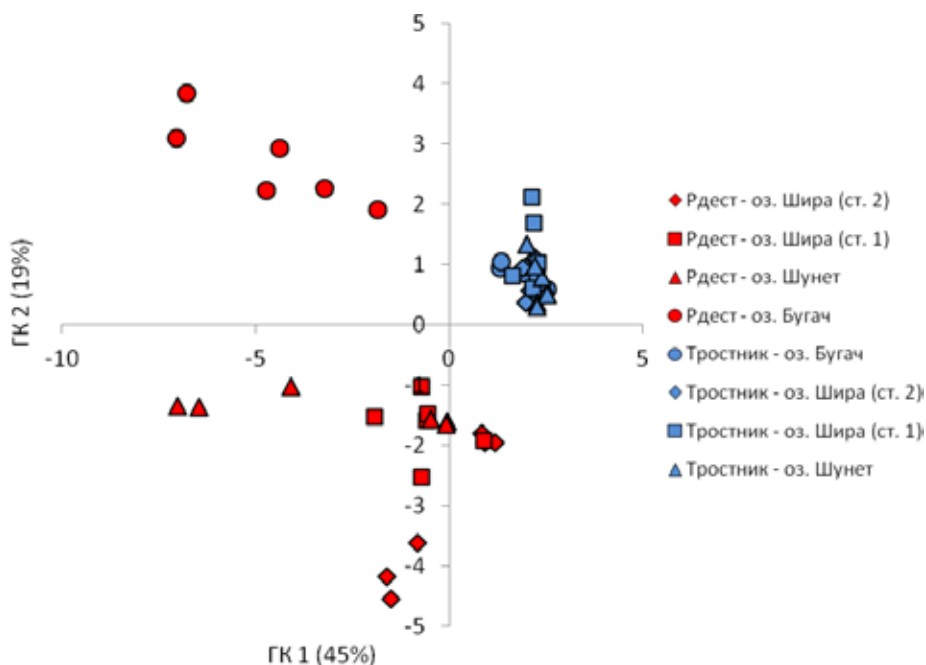


Рис. 2. Результаты мультивариантного анализа методом главных компонент, выполненного для содержания металлов в биомассе рдеста гребенчатого и тростника южного

чительно ниже, чем в пробах рдеста (рис. 2). Расхождение видов макрофитов происходит, прежде всего, по первой ГК (45 % изменчивости) и связано, как уже обсуждалось, с более высокими концентрациями практически всех металлов в биомассе *P. pectinatus*, из которых факторная нагрузка наиболее велика для Fe, Ti, Sr, Ni, V и Co (табл. 3). Разброс данных по второй компоненте (19 %), где наибольший вклад вносят свинец, натрий и медь, связан уже с дифференциацией проб по водоемам. Для детальной оценки характера накопления металлов видами из разных водоемов проведен анализ главных компонент отдельно по видам – тростнику и рдесту (рис. 3, 4).

При анализе образцов вида *Ph. australis* методом главных компонент относительно однородную группу по первой ГК (33 %) формируют пробы тростника из пресноводной части оз. Ши́ра и оз. Шунет; по второй ГК (21 %) – пробы из водохранилища Бугач, кото-

рые обособлены, и по первой ГК (рис. 3). В то же время для проб тростника из солоноватоводной части оз. Ши́ра характерна изменчивость, связанная с датой отбора проб. Пробы 2013 г. значительно обособлены от проб 2012 г. и от проб из пресноводной части оз. Ши́ра и оз. Шунет по первой ГК. Пробы, отобранные в 2012 г. на станциях 1 и 2 оз. Ши́ра, расположенных на участках разной солености, полностью перекрываются. Основной вклад в первую ГК вносят железо, алюминий, никель, ванадий, кобальт, в ГК 2 – преимущественно щелочные и щелочноземельные металлы калий, натрий, магний, кальций (табл. 3). При этом по ГК 2 калий, кальций являются антагонистами натрия.

Отдельный анализ образцов *P. pectinatus* в пространстве первой ГК, объясняющей практически половину всей изменчивости (45 %), показал, что основной положительный вклад вносит натрий, отрицательный –

Таблица 3. Вклад отдельных факторов (содержание металлов) в общую дисперсию данных, связанную с первой (ГК 1) и второй (ГК 2) главными компонентами мультивариантного анализа методом главных компонент

Металл	<i>P. pectinatus</i> + <i>Ph. australis</i>		<i>Ph. australis</i>		<i>P. pectinatus</i>	
	ГК 1	ГК 2	ГК 1	ГК 2	ГК 1	ГК 2
Na	-0,30	-0,72	-0,39	0,72	0,85	0,05
K	-0,51	-0,23	0,26	-0,91	0,13	-0,64
Ca	-0,66	0,54	-0,13	-0,69	-0,77	-0,52
Fe	-0,94	0,03	-0,95	0,05	-0,86	0,40
Mg	-0,65	-0,68	0,00	0,75	0,44	0,76
Cu	-0,18	0,71	0,08	-0,16	-0,84	-0,40
Mn	-0,28	-0,58	-0,33	-0,74	0,19	0,36
Zn	-0,27	-0,03	0,09	-0,41	-0,28	0,15
Pb	-0,28	-0,80	0,17	0,52	0,35	0,71
Al	-0,74	0,51	-0,87	-0,27	-0,84	-0,47
Ti	-0,83	0,03	-0,71	-0,12	-0,72	0,47
Sr	-0,81	0,34	0,66	0,39	-0,85	-0,34
Mo	-0,62	0,30	-0,12	0,20	-0,58	-0,26
Ni	-0,82	0,06	-0,84	0,14	-0,75	0,36
Cd	-0,75	-0,28	-0,22	0,18	-0,51	0,77
V	-0,96	0,18	-0,90	-0,06	-0,96	0,20
Co	-0,93	-0,17	-0,91	0,27	-0,77	0,39
Cr	-0,70	-0,08	-0,75	0,02	-0,54	0,57

целая группа металлов (Fe, Cu, Al, Sr, V, Ti, Ni, Co) (рис. 4, табл. 3). Содержание последних элементов наиболее велико у рдестов из водохранилища Бугач и оз. Шунет (в 2012 г.). Распределение проб по второй ГК не связано с какой-либо одной группой металлов.

Заключение

Проведенный анализ главных компонент отдельно по каждому виду макрофитов позволил определить, что условия окружающей среды, в частности химический состав воды, оказывают влияние на валовое содержание металлов в растениях. Оба вида макрофитов из пресноводного водохранилища Бугач отличались более высокими

концентрациями железа, алюминия, никеля, ванадия и кобальта по сравнению с теми же видами макрофитов, собранными в солоноватоводных озерах. Однако как пробы тростника южного, так и рдеста гребенчатого, собранные в опресненной и солоноватоводной частях оз. Ширы, практически не обособлены друг от друга. В ряде случаев пробы из одной точки, но собранные в разные годы имели существенные различия – это наблюдалось для растений тростника из солоноватоводной станции оз. Ширы и растений рдеста из оз. Шунет. Было установлено, что наиболее высокое валовое содержание большинства металлов характерно для *P. pectinatus*.

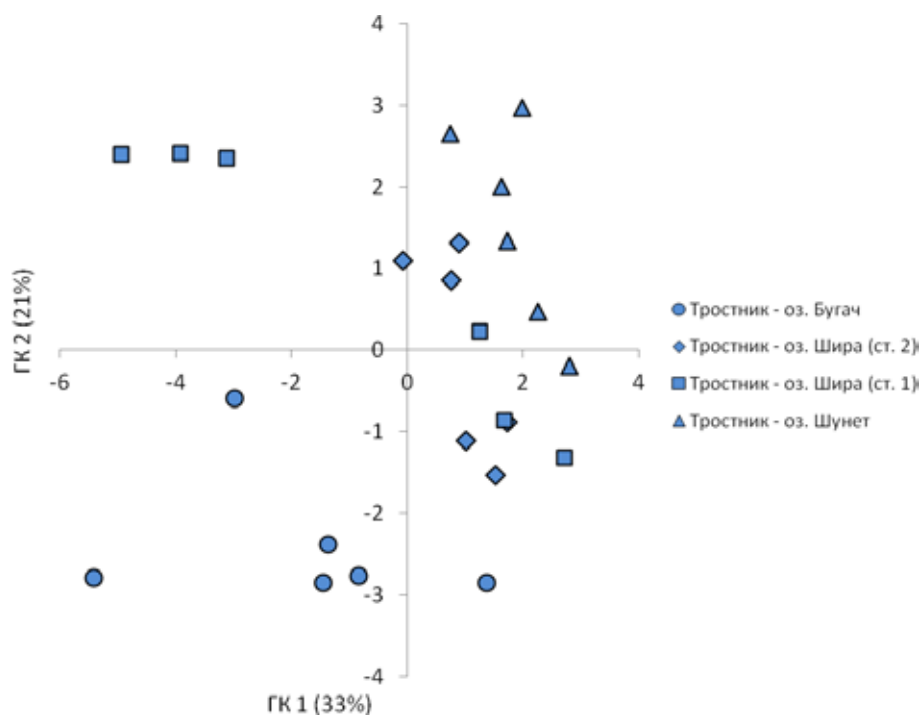


Рис. 3. Результаты мультивариантного анализа методом главных компонент, выполненного для содержания металлов в биомассе тростника южного

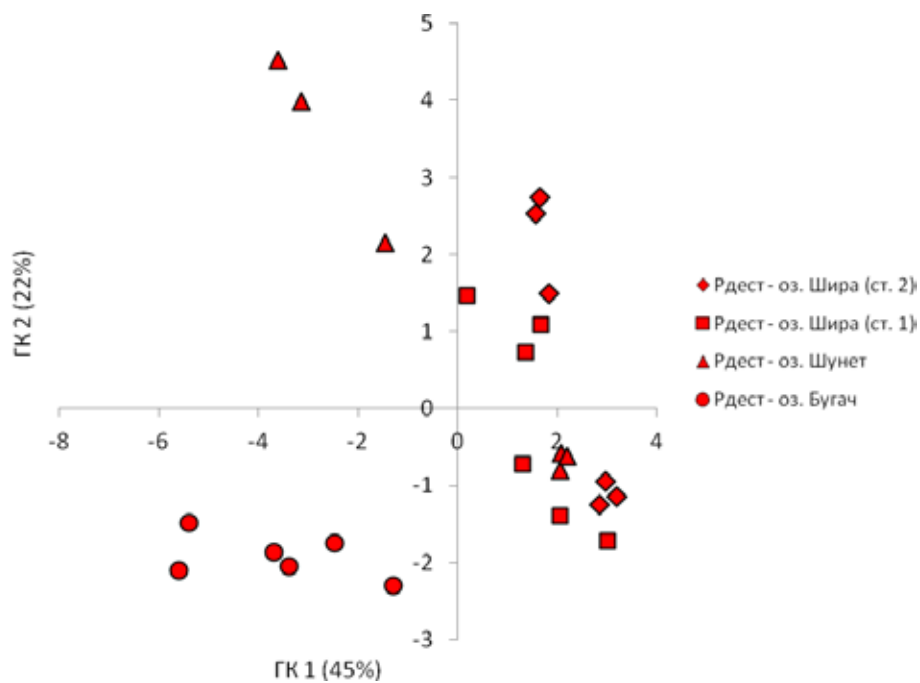


Рис. 4. Результаты мультивариантного анализа методом главных компонент, выполненного для содержания металлов в биомассе рдеста гребенчатого

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации Сибирскому федеральному университету на 2014-2016 годы (проект № 3079) и частично гранта РФФИ 15-04-00797.

Список литературы

1. Бугаков П.С., Горбачева С.М., Чупрова В.В. (1981) Почвы Красноярского края. Красноярск: Кн. изд-во, 128 с. [Bugakov P.S., Gorbacheva S.M., Chuprova V.V. (1981) The soil of the Krasnoyarsk region. Krasnoyarsk: Kn. izd-vo, 128 p.]
2. Власюк П.А., Климовицкая З.М. (1969) Физиологическое значение марганца для роста и развития растений. М.: Колос, 164 с. [Vlasyuk P.A., Klimovickaya Z.M. (1969) The physiological importance of manganese on growth and development of plants. M.: Kolos, 164 p.]
3. Гаевская Н.С. (1966) Роль высших водных растений в питании животных пресных водоемов. М.: Наука, 327 с. [Gaevskaya N.S. (1966) The role of the higher aquatic plants in freshwater animals feeding. M.: Nauka, 327 p.]
4. Жемчужина Хакасии (Природный комплекс Ширинского района). (1977) Парначев В.П., Букатин И.В. (Ред.) Абакан: Изд-во Хакасского госуниверситета им. Н.Ф. Кatanова, 180 с. [Pearl of Khakassia (Natural complex of Shyrinskyi district). (1977) V.P. Parnachev and I.V. Bukatin (Eds.) Abakan: Izd-vo N.F. Katanov Khakas State University, 180 p.]
5. Катанская В.М. (1981) Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. Л.: Наука, 187 с. [Katanskaya V.M. (1981) A water vegetation of continental water bodies of the USSR. Methods of study. L.: Nauka, 187 p.]
6. Кулижский С.П., Родикова А.В. (2012) Особенности формирования элементного состава элювиальных почв транзитных позиций ландшафтных геохимических арен Ширинской степи. Вестник Омского государственного университета 6 (142): 94-97. [Kulizhskiy S.P., Rodikova A.V. (2012) The features of elements composition forming of Shira steppe soils of eluvial transit positions of landscape geochemical arenas. Vestnik of the Omsk State University 6 (142): 94-97.]
7. Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н. (1988) Физиология высших водных растений. Киев: Наукова думка, 188 с. [Lukina L.F., Smirnova N.N. (1988) Physiology of higher aquatic plants. Kiev: Naukova dumka, 188 p.]
8. Медведев С.С. (2004) Физиология растений. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 336 с. [Medvedev S.S. (2004) Plant physiology. S-Pb: Publishing house of St. Petersburg University, 336 p.]
9. Мур Дж.В., Рамамурти С. (1987) Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 287 с. [Moore J.C., Ramamurti S. (1987) Heavy metals in natural waters. Moscow: Mir, 287 p.]
10. Мучкина Е.Я., Новикова В.Б. (2004) Бактериопланктон малого рекреационного водохранилища Бугач. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 155 с. [Muchkina E.Y., Novikova V.B. (2004) Bacterioplankton of the small recreational reservoir Bugach. Krasnoyarsk: Krasnoyar. State. Agrar. University, 155 p.]
11. Никаноров А.М., Жулидов А.В. (1991) Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоздат, 311 с. [Nikanorov A.M., Zhulidov A.V. (1991) Biomonitoring of metals in freshwater ecosystems. L.: Gidrometeoizdat, 311 p.]

12. Природный комплекс и биоразнообразие участка «Озеро Шира» заповедника «Хакасский» (2011) В.В. Непомнящий (Ред.) Абакан: Хакасское книжное изд-во, 420 с. [Nature and biodiversity of the Lake Shira «Khakassky national reserve» (2011) V.V. Nepomnyashchiy (Ed.) Abakan: Hakasskoe knizhnoe Izd-vo, 420 p.]
13. Спицына Т.П. (2005) Система оценки загрязнения естественных водотоков Красноярского промышленного региона: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 174 с. [Spitsina T.P. (2005) Assessment of natural watercourses Krasnoyarsk industrial region: dis. ... kand. tech. sciences. Krasnoyarsk, 174 p.]
14. Dunbabin J.S., Bowmer K.H. (1992) Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals. *The Science of the Total Environment* 11: 151-168.
15. Gladyshev M.I., Gribovskaya I.V., Ivanova E.A., Moskvicheva A.V., Muchkina E.Ya., Chuprov S.M. (2001) Metal concentrations in the ecosystem and around recreational and fish-breeding pond Bugach. *Water Resources* 28 (3): 288-296
16. Ivanova E.A., Anishchenko O. V., Gribovskaya I.V., Zinenko G.K., Nazarenko N.S., Nemchinov V. G., Zuev I.V., Avramov A.P. (2012) Metal content in higher aquatic plants in a small siberian water reservoir. *Contemporary Problems of Ecology* 5 (4): 356-364.
17. Kalacheva G.S., Gubanov V.G., Gribovskaya I.V., Gladchenko I.A., Zinenko G.K., Savitsky S.V. (2002) Chemical analysis of lake Shira water (1997-2000). *Aquatic Ecology* 36: 123-141.
18. Kumar J.I.N., Soni H., Kumar R.N., Bhatt I. (2008) Macrophytes in phytoremediation of heavy metal contaminated water and sediments in Pariyej Community Reserve, Gujarat, India. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 8: 193-200.
19. Munteanu G.G., Munteanu V.I. (2005) Bioindication of mercury pollution of the Dubossary Reservoir. *Water Resources* 32(4): 422-427.
20. Nikolić Lj., Dzigurski D., Ljevnaić-Masić B. (2014) Nutrient removal by *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. in the constructed wetland system. *Contemporary Problems of Ecology* 7 (4): 449-454.
21. Rogozin D.Yu., Pulyayevskaya M.V., Zuev I.V., Makhutova O.N., Degermendzhi A.G. (2011) Growth, diet and fatty acid composition of Gibel carp *Carassius gibelio* in lake Shira, a brackish water body in Southern Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Biology* 4(1): 86-103.
22. Sawidis T., Chettri M.K., Zachariadis G.A., Atratis J.A. (1995) Heavy metals in aquatic plants and sediments from water systems in Macedonia, Greece. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 32: 73-80.
23. St-Cyr L., Cambell P.G.C., Guertin K. (1994) Evaluation of the role of submerged plant beds in the metal budget of a fluvial lake. *Hydrobiologia* 291: 141-156.
24. Szymanowska A., Samecka-Cymerman A., Kempers A.J. (1999) Heavy metals in three lakes in West Poland. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 43: 21-29.