

**АНАЛИЗ МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
В РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ БАШКИРСКОГО ЗАУРАЛЬЯ**© 2015 З.Б. Бактыбаева¹, С.М. Ямалов², А.А. Кулагин³¹ Институт региональных исследований Республики Башкортостан, г. Сибай² Ботанический сад-институт Уфимского научного центра РАН, г. Уфа³ Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, г. Уфа

Поступила в редакцию 26.05.2015

Приведены результаты изучения содержания тяжелых металлов (Zn, Cu и Cd) в воде, донных отложениях, фитомассе тростника обыкновенного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) и рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) в зоне воздействия объектов горнопромышленного комплекса Республики Башкортостан. Показано, что вдоль градиента загрязнения наблюдается повышение уровня содержания металлов.

Ключевые слова: *загрязнение, тяжелые металлы, макрофиты, тростник обыкновенный, рогоз узколистный*

Зауралье Республики Башкортостан (РБ) характеризуется рудопоявлениями медно-колчеданного и смешанного полиметаллического состава. Освоение и разработка месторождений полезных ископаемых в регионе сопровождаются всесторонним воздействием на окружающую среду, включая ландшафтно-деструктивные, параметрические и эмиссионные нарушения [6]. Одними из наиболее уязвимых элементов ландшафта являются водоемы. Добыча и переработка руд приводят к загрязнению водных экосистем тяжелыми металлами (ТМ), поступление которых происходит со сбросом неочищенных или недостаточно очищенных рудничных вод, стоком хвостохранилищ. Вынос гидрогенными потоками токсичных химических элементов продолжается и после завершения эксплуатации месторождений, так как в результате проникновения атмосферных осадков в толщу отвалов происходит процесс окисления отходов добычи и переработки, приводящий к увеличению растворимости ТМ и вымывание их в подотвальные воды [1].

В течение нескольких десятилетий высокому техногенному загрязнению в регионе подвергаются водосборы рек Таналык и Карагайлы. Таналык является притоком р. Урал. Длина водотока составляет 225 км. На водосборной территории реки расположено значительное количество объектов горнорудной промышленности. Наиболее опасными из них являются отработанное

серно-колчеданное месторождение Куль-Юрт-Тау и объекты Бурибаевского горно-обогатительного комбината (ГОК). Месторождение Куль-Юрт-Тау находится в верхнем течении реки рядом с г. Баймак. Отработанный карьер расположен на вершине сопки в 1,5 км от русла. Образующиеся подотвальными воды техногенного объекта вместе с поверхностным стоком и грунтовыми водами поступают в р. Таналык. Бурибаевский ГОК находится примерно в 130 км от истока реки на территории п. Бурибай. Источниками загрязнения являются обогатительная фабрика по переработке медно-колчеданных руд, рудные и породные отвалы вокруг карьера и два хвостохранилища. Образующиеся подотвальными воды и фильтрат хвостохранилищ стекают в Таналык.

Карагайлы – приток р. Урал второго порядка. Длина водотока составляет 28 км. Среднее и нижнее течение реки расположено в черте пригородных поселков и промзоны г. Сибай. Карагайлы является приемником шахтных вод подземного рудника и подотвальных вод Сибайского рудного карьера. В непосредственной близости к руслу реки находятся старое и новое хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики. Вода из рек Таналык и Карагайлы используется для хозяйственно-бытовых нужд населением, сельскохозяйственного водоснабжения, рекреации. Как известно, большинство ТМ являются важными для жизни микроэлементами, однако с увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду происходит их избыточное поступление в организм человека по пищевым цепям. При этом, обладая кумулятивными свойствами, ТМ могут приводить к нарушениям метаболизма, проявлять канцерогенные свойства [2, 3, 5]. Поэтому исследования, направленные на изучение распределения ТМ в объектах окружающей среды весьма актуальны.

Бактыбаева Зульфия Булатовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. E-mail: baktybaeva@mail.ru

Ямалов Сергей Маратович, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: geobotanika@mail.ru

Кулагин Андрей Алексеевич, доктор биологических наук, профессор. E-mail: kulagin-aa@mail.ru

Цель работы: определение содержания ТМ в компонентах речных экосистем в зоне воздействия объектов горнорудной промышленности.

Материал и методы. Исследования проводили в течение полевых сезонов 2006-2011 гг. На первом этапе было осуществлено геоботаническое обследование территории, выявлены преобладающие типы водных и прибрежно-водных сообществ и их основные доминанты. Затем вдоль градиентов загрязнения высокоминерализованными стоками были заложены три системы ключевых участков, на которых изучались динамика флористического состава сообществ, их синтетические характеристики, а также содержание приоритетных тяжелых металлов в воде, донных отложениях, водных макрофитах.

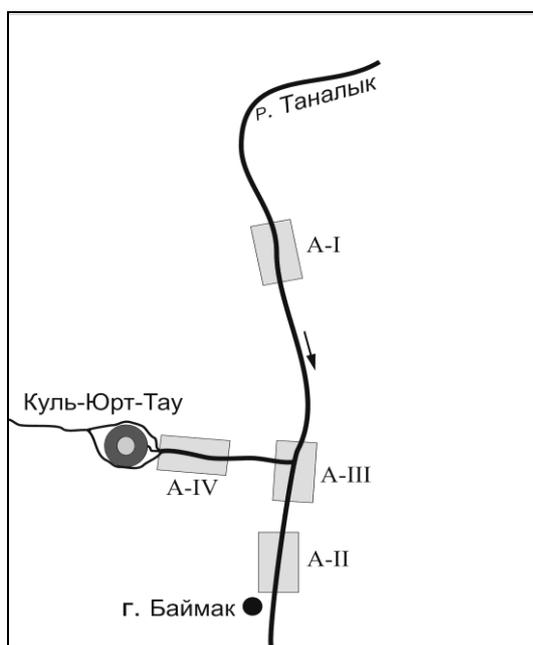


Рис. 1. Расположение ключевых участков системы А

Система А состояла из четырех участков, отражающих разные градации загрязнения р. Таналык подотвальными водами месторождения Куль-Юрт-Тай. Участок А-IV с наибольшим загрязнением

был заложен в непосредственной близости от отвалов карьера на притоке с поступающими в него подотвальными водами; участок А-III – на расстоянии 1,5 км от участка А-IV, в русле р. Таналык в месте впадения загрязненного притока; участок А-II – в русле р. Таналык на расстоянии 3 км ниже по течению от А-III; участок А-I – условный контроль – на расстоянии 10 км выше впадения загрязненного притока.

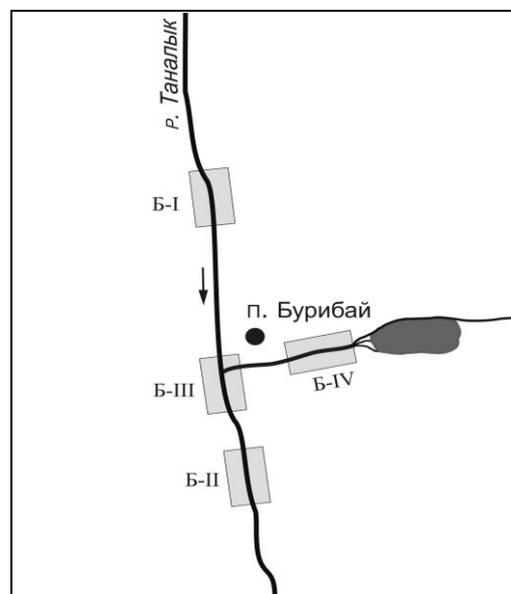


Рис. 2. Расположение ключевых участков системы Б

Система Б состояла из четырех участков, отражающих разные градации загрязнения р. Таналык стоками объектов Бурибаевского ГОК. Участок Б-IV был заложен на притоке, загрязняемом фильтратом хвостохранилища; участок Б-III – на расстоянии 1,5 км от участка Б-IV в русле р. Таналык в месте впадения загрязненного притока; участок Б-II – в русле р. Таналык на расстоянии 3 км ниже по течению от Б-III; участок Б-I был выбран выше места впадения загрязненного притока (условный контроль).

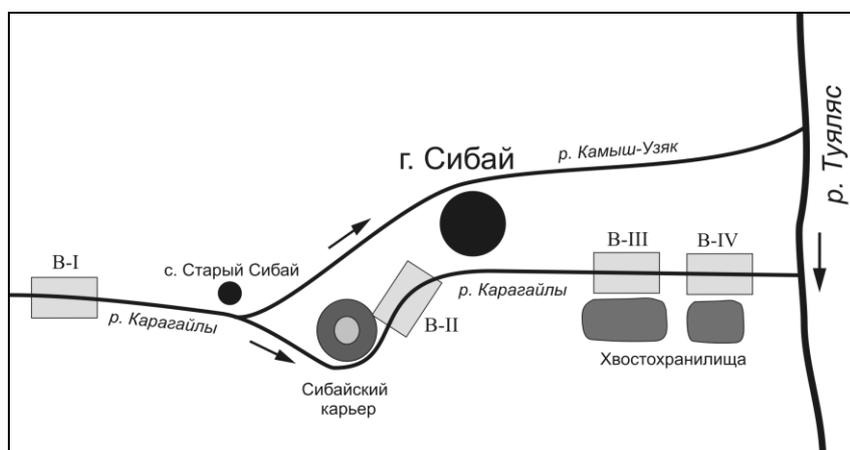


Рис. 3. Расположение ключевых участков системы В

Система В состояла из следующих участков: В-I (условный контроль) располагался в верхнем течении р. Карагайлы, не загрязняемом бытовыми и промышленными стоками; участок В-II – в черте г. Сибай, где происходит загрязнение реки подотвальными и шахтными водами; участок В-III – на расстоянии 7,5 км ниже по течению от В-II, у старого хвостохранилища обогатительной фабрики; участок В-IV – на расстоянии 1,5 км ниже по течению от В-III, у нового хвостохранилища.

Из-за различий в составе руды и расположении промплощадок на рельефе местности перечисленные горнорудные объекты несколько отличаются по составу загрязнителей и степени воздействия на водотоки.

На каждом ключевом участке в 5-кратной повторности были отобраны пробы воды, грунта и растительных образцов. Пробы донных отложений отбирали с глубины 0–20 см одновременно с растительными образцами. В лабораторных условиях донные осадки высушивались до воздушно-сухого состояния и просеивались через сито с диаметром ячеек 1 мм, впоследствии анализировались на содержание подвижных формы тяжелых металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с рН 4,8. Растительные образцы в лабораторных условиях высушивались до воздушно-сухого состояния

и измельчались. Содержание ТМ определялось отдельно в надземной и подземной части растений. Измерения массовых концентраций цинка, меди и кадмия проводились методом инверсионной вольтамперометрии на приборе СТА. Полученные данные были подвергнуты однофакторному дисперсионному анализу.

Результаты и их обсуждение. Водные и прибрежно-водные растительные сообщества исследованной территории отличаются бедным видовым составом, простым строением и монодоминированием (в редких случаях – доминированием двух видов). Анализ влияния загрязнения воды и донных отложений ТМ на водную и прибрежно-водную растительность показал снижение альфа- и бета-разнообразия, проективного покрытия, средней высоты сообществ и продуктивности доминантов вдоль градиента загрязнения, что отражается в изменении физиономического облика отдельных сообществ и всего комплекса прибрежно-водной растительности. Сообщества с доминированием тростника обыкновенного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) и рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) играют ведущую роль в сложении растительности на всем градиенте загрязнения [4; 8]. Для изучения накопления ТМ макрофитами были выбраны перечисленные виды.

Таблица 1. Содержание ТМ в воде (в числителе – мг/дм³) и донных отложениях (в знаменателе – мг/кг) на ключевых участках

Системы ключевых участков	Ключевой участок			
	I	II	III	IV
Zn				
Система А	$\frac{0,03 \pm 0,01}{3,70 \pm 0,43}$	$\frac{0,10 \pm 0,02}{8,19 \pm 0,67}$	$\frac{0,14 \pm 0,02}{12,97 \pm 2,06}$	$\frac{0,40 \pm 0,05}{14,49 \pm 2,25}$
Система Б	$\frac{0,02 \pm 0,004}{0,93 \pm 0,12}$	$\frac{0,24 \pm 0,022}{4,39 \pm 0,34}$	$\frac{0,60 \pm 0,036}{11,38 \pm 2,28}$	$\frac{1,20 \pm 0,045}{45,21 \pm 4,55}$
Система В	$\frac{0,08 \pm 0,01}{4,26 \pm 1,49}$	$\frac{13,20 \pm 2,17}{14,14 \pm 3,54}$	$\frac{7,10 \pm 0,85}{4,20 \pm 1,62}$	$\frac{9,46 \pm 0,46}{6,32 \pm 0,86}$
Cu				
Система А	$\frac{0,014 \pm 0,002}{0,84 \pm 0,07}$	$\frac{0,020 \pm 0,004}{1,62 \pm 0,07}$	$\frac{0,030 \pm 0,006}{3,10 \pm 0,08}$	$\frac{0,035 \pm 0,008}{5,20 \pm 0,06}$
Система Б	$\frac{0,002 \pm 0,0002}{2,70 \pm 0,24}$	$\frac{0,080 \pm 0,0032}{22,34 \pm 3,33}$	$\frac{0,090 \pm 0,0038}{26,22 \pm 4,84}$	$\frac{1,102 \pm 0,066}{42,83 \pm 3,50}$
Система В	$\frac{0,004 \pm 0,001}{0,60 \pm 0,18}$	$\frac{0,92 \pm 0,12}{1,42 \pm 0,13}$	$\frac{2,08 \pm 0,37}{6,32 \pm 1,61}$	$\frac{2,58 \pm 0,47}{3,62 \pm 0,73}$
Cd				
Система А	$\frac{\text{н.о.}}{0,005 \pm 0,0004}$	$\frac{0,0001}{0,03 \pm 0,003}$	$\frac{0,0001}{0,02 \pm 0,0035}$	$\frac{0,0008 \pm 0,0001}{0,02 \pm 0,0029}$
Система Б	$\frac{0,005 \pm 0,0002}{0,0002 \pm 0,00004}$	$\frac{0,021 \pm 0,0028}{0,0005 \pm 0,0001}$	$\frac{0,022 \pm 0,0034}{0,0802 \pm 0,0054}$	$\frac{0,027 \pm 0,0023}{0,12 \pm 0,0187}$
Система В	$\frac{0,0007 \pm 0,0001}{0,01 \pm 0,002}$	$\frac{0,017 \pm 0,001}{0,05 \pm 0,015}$	$\frac{0,048 \pm 0,007}{0,31 \pm 0,072}$	$\frac{0,066 \pm 0,008}{0,22 \pm 0,077}$

Примечание: н.о. – не обнаружено.

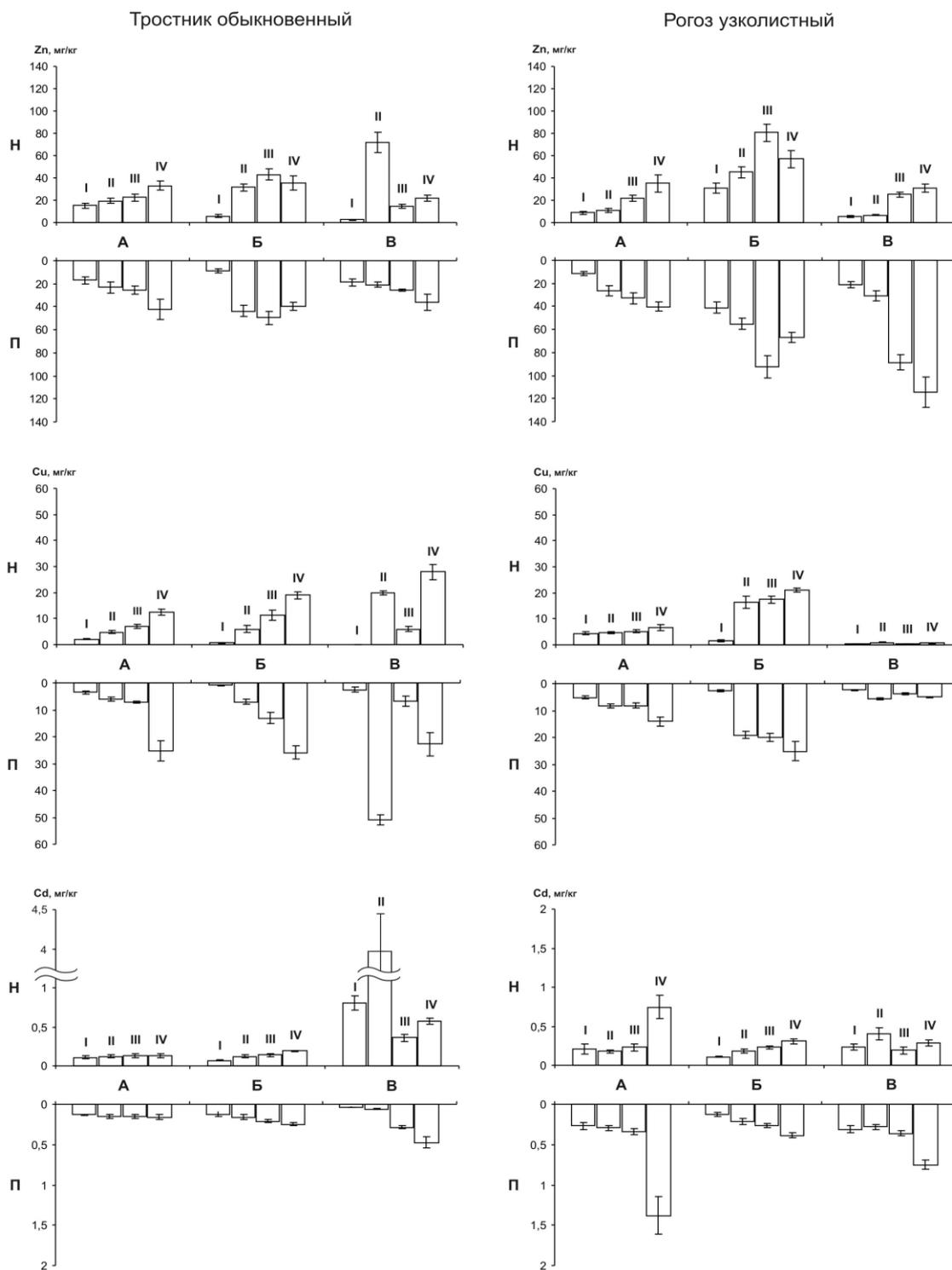


Рис. 4. Содержание ТМ в фитомассе тростника обыкновенного и рогоза узколистого на ключевых участках:

условные обозначения: А – система ключевых участков А (I, II, III IV); Б – система ключевых участков Б (I, II, III IV); В – система ключевых участков В (I, II, III IV); Н – в надземной фитомассе; П – в подземной фитомассе.

Результаты исследований показали, что уровень рассматриваемых элементов в воде и донных отложениях на загрязняемых участках достоверно выше по сравнению с контрольными территориями (табл. 1). Исключение составляет лишь содержание цинка в грунте с участка В-III. В целом, для ключевых участков характерен следующий убывающий ряд металлов в речных

компонентах: $Zn > Cu > Cd$. Содержание меди больше, чем цинка только в донных отложениях с участков Б-I, Б-II, Б-III и В-III. В воде уровень цинка и меди на всех участках систем А, Б и В превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) для водоемов рыбохозяйственного значения [7]. Максимальные концентрации данных элементов отмечены на участках р. Карагайлы: В-II, В-III и В-

IV, где превышение нормативов по цинку – от 710 до 1320 ПДК, по меди – от 920 до 2580 ПДК. Повышенное содержание данных металлов на контрольных участках систем А и В, вероятно, связано с особенностями естественного геохимического фона региона, а на участке Б-I – с фоновым загрязнением (на участке р. Таналык до п. Бурибай расположен ряд действующих и отработанных месторождений). Показатели кадмия в воде на всех участках системы А и на контрольных участках систем Б и В – в пределах нормы; на остальных участках превышают ПДК в 4–13 раз.

В укореняющихся макрофитах уровень концентрации металлов зависит от их содержания в воде и донных отложениях, а также степени доступности растениям и физиологической роли элемента. Как показано на рис. 4, в тканях тростника и рогоза содержание рассматриваемых ТМ убывает в последовательности $Zn > Cu > Cd$. При этом чаще всего в подземной фитомассе ТМ аккумулируется больше, чем в надземной. По мере повышения степени загрязнения среды обитания растений наблюдается и увеличение концентрации ТМ в фитомассе. Так, в тростнике содержание цинка достигает $72,00 \pm 8,89$ мг/кг в надземной части и $49,60 \pm 5,90$ мг/кг в подземной; меди – $28,00 \pm 2,92$ и $51,00 \pm 2,00$; кадмия – $3,94 \pm 0,59$ и $0,47 \pm 0,02$, соответственно. В рогозе содержание цинка достигает $80,68 \pm 7,62$ мг/кг в надземной части и $114,40 \pm 12,90$ мг/кг в подземной; меди – $21,05 \pm 0,90$ и $25,17 \pm 3,47$; кадмия – $0,74 \pm 0,15$ и $1,38 \pm 0,23$, соответственно. То есть, произрастая в идентичных условиях, разные виды макрофитов накапливают ТМ в разных количествах.

При сравнении аккумулирующей способности растений видно, что цинка и кадмия, за некоторым исключением, больше накапливается в фитомассе рогоза, а меди – в фитомассе тростника. Как показали геоботанические исследования, более устойчив к минеральному загрязнению тростник обыкновенный, который может произрастать в условиях высокого засоления среды, при котором другие виды макрофитов погибают. Являясь космополитом и обладая высокой экологической пластичностью, тростник первым «поселяется» и при зарастании техногенных водоемов (затопленных карьеров, хвостохранилищ), образуя на первых этапах зарастания моновидовые сообщества.

Ключевые участки А-II и Б-II, расположенные на 3 км ниже по течению от места впадения загрязненных притоков, позволяют оценить самоочищающуюся способность р. Таналык. Как видно из полученных данных, на этих участках содержание ТМ в рассматриваемых компонентах снижается, хотя и не достигает уровня контроля. Самоочищение водоемов происходит в результате химического преобразования токсичных веществ и осаждения. Значительную роль играют заросли макрофитов, являющихся аккумуляторами макро- и микроэлементов. С другой стороны, выступающие в

роли депонирующей среды донные отложения и водные растения, при определенных условиях могут стать источниками вторичного загрязнения воды. Следует учитывать, что продолжающееся поступление токсикантов со стоками, может привести к утрате водным объектом способности к самоочищению.

Ключевые участки А-II и Б-II, расположенные на 3 км ниже по течению от места впадения загрязненных притоков, позволяют оценить самоочищающуюся способность р. Таналык. Как видно из полученных данных, на этих участках содержание ТМ в рассматриваемых компонентах снижается, хотя и не достигает уровня контроля. Самоочищение водоемов происходит в результате химического преобразования токсичных веществ и осаждения. Значительную роль играют заросли макрофитов, являющихся аккумуляторами макро- и микроэлементов. С другой стороны, выступающие в роли депонирующей среды донные отложения и водные растения, при определенных условиях могут стать источниками вторичного загрязнения воды. Следует учитывать, что продолжающееся поступление токсикантов со стоками, может привести к утрате водным объектом способности к самоочищению.

Выводы: проведенные исследования показывают, что объекты горнопромышленного комплекса являются источниками загрязнения речных экосистем Зауралья РБ тяжелыми металлами. При этом экологическая ситуация осложняется наложением техногенного загрязнения ТМ на общий повышенный геохимический фон их содержания в окружающей среде, обусловленный рудной минерализацией. Сведения, получаемые при одновременном изучении геоботанических характеристик (состава и структуры растительности) и химического состава компонентов позволяют прогнозировать устойчивость водных экосистем и допустимость нагрузок на среду в целом. Исследования способности тростника и рогоза аккумулировать в тканях ТМ представляет не только теоретический, но и практический интерес, так как данные могут быть использованы для разработки методов фиторемедиации водных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Абдрахманов, Р.Ф.* Гидрогеоэкология Башкортостана. – Уфа: Информреклама, 2005. 344 с.
2. *Алексеев, Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. – Л.: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 142 с.
3. *Алексеева-Попова, Н.В.* Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов. – Л., 1991. С. 5.
4. *Бактыбаева, З.Б.* Загрязнение тяжелыми металлами экосистемы реки Таналык, сообщества водных макрофитов и возможности их использования для биологической очистки. Под ред. *Б.М. Миркина / З.Б. Бактыбаева, Я.Т. Суондуков, С.М. Ямалов, У.Б. Юнусбаев.* – Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. 208 с.

5. Майстренко, В.Н. Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов / В.Н. Майстренко, Р.З. Хамитов, Г.Л. Будников. – М.: Химия, 1996. 319 с.
6. Опекунова, М.Г. Оценка экологического состояния почв в районе воздействия горнорудных предприятий Южного Урала // Ресурсный потенциал почв – основа продовольственной и экологической безопасности России: матер. междунар. науч. конф. – СПб., 2011. С. 440-442.
7. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 18 января 2010 г. № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».
8. Baktybaeva, Z.B. Effect of Heavy Metal Pollution on Plant Communities of the Tanalyk River, the Bashkir Transural Region / Z.B. Baktybaeva, S.M. Yamalov, Ya.T. Suyundukov // Russian Journal of Ecology. 2011. Vol. 42. No. 5. P. 378-381.

ANALYSIS OF HEAVY METALS MIGRATORY FLOWS IN THE RIVER ECOSYSTEMS OF BASHKIR ZAURALYE

© 2015 Z.B. Baktybaeva¹, S.M. Yamalov², A.A. Kulagin³

¹Institute for Regional Researches of Bashkortostan Republic, Sibay

²Botanical Garden-Institute, Ufa Scientific Centre, RAS

³Bashkir State Pedagogical University, Ufa

The results of investigation the amounts of heavy metals (Zn, Cu and Cd) in water, bottom sediments, the phytomass of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. and *Typha angustifolia* L. in the zone of mining complex influence in Bashkortostan Republic are presented. It is shown that increase of metals level is observed along the pollution gradient.

Keywords: *pollution, heavy metal, macrophytes, Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Typha angustifolia* L.

Zulfiya Baktybaeva, Candidate of Biology, Senior Research Fellow. E-mail: baktybaeva@mail.ru
Sergey Yamalov, Doctor of Biology, Leading Research Fellow. E-mail: geobotanika@mail.ru
Andrey Kulagin, Doctor of Biology, Professor. E-mail: kulagin-aa@mail.ru