

З.Б.Бактыбаева¹, Р.А.Сулейманов¹, М.А.Мукашева²,
Т.К.Валеев¹, Н.Р.Рахматуллин¹, А.А.Кулагин³

¹ФБУН «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека», Россия;

²Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;

³Башкирский государственный педагогический университет им. М.Акумлы, Уфа, Россия
(E-mail: baktybaeva@mail.ru)

Экологическая оценка содержания тяжелых металлов в компонентах речных экосистем горнорудных территорий Республики Башкортостан

Загрязнение водных объектов в районах с развитой промышленностью обусловлено первичной и вторичной нагрузкой, как бактериальной, так и химической, что формирует непосредственную и потенциальную опасность. Выпуск неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод определяет первичную нагрузку на водоем, непосредственная токсическая опасность которой для здоровья обусловлена преимущественно тяжелыми металлами. Авторами приведены результаты изучения содержания тяжелых металлов (Zn, Cu и Cd) в воде, донных отложениях и фитомассе рдеста блестящего (*Potamogeton lucens* L) в зоне воздействия объектов горнопромышленного комплекса Республики Башкортостан. Показано, что вдоль градиента загрязнения наблюдается повышение уровня содержания металлов.

Ключевые слова: загрязнение, тяжелые металлы, поверхностные водоемы, донные отложения, макрофиты, рдест блестящий.

Южный Урал, где широко распространены полиметаллическое и медно-колчеданное оруденения, относится к районам естественных геохимических аномалий [1]. Освоение и разработка месторождений полезных ископаемых в Зауралье Республики Башкортостан (РБ) сопровождаются всесторонним воздействием на окружающую среду. Одними из наиболее уязвимых элементов ландшафта являются поверхностные водоемы, используемые для рыбохозяйственных целей, сельскохозяйственного водоснабжения, рекреации и хозяйственно-бытовых нужд населения [2]. Добыча и переработка руд приводят к загрязнению водных экосистем тяжелыми металлами (ТМ), поступление которых происходит в основном со сбросом неочищенных или недостаточно очищенных шахтных, рудничных и подотвалных вод [3]. Вынос гидрогенными потоками токсичных химических элементов продолжается и после завершения эксплуатации месторождений. Как отмечают Р.Ф.Абдрахманов и В.Г.Попов [4], горное производство приводит к перераспределению химических веществ в природе. При этом масштабы и интенсивность техногенных геохимических аномалий во много раз превышают параметры природных геохимических полей.

В воде в результате протекания процессов комплексообразования, коагуляции, адсорбции, изменения окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий происходят трансформация поступающих химических форм металлов и образование устойчивых в данных условиях сосуществующих растворенных форм, определяющих степень токсичности того или иного металла [5].

А.Ю.Опекунов [1] отмечает, что вода обладает высокой динамичностью, которая зависит от гидрометеорологических факторов и гидродинамических характеристик. В связи с этим значение и достоверность результатов исследований, ограниченных только показателями загрязнителей в воде, снижается. Донные отложения являются консервативной системой, и поэтому результаты исследований осадков являются более информативными показателями. Для целей экологического мониторинга важным является классификация донных отложений по размеру составляющих их частиц. Как правило, с уменьшением размера фракций грунта содержание металлов в них увеличивается. Существует несколько методик определения ТМ в донных отложениях. При этом различные реагенты извлекают из пробы определенные формы металлов либо металлы, связанные с конкретными фазами грунта. Подвижные формы металлов быстрее включаются в миграционные потоки, переходя в растворенное состояние, хорошо усваиваются гидробионтами и могут трансформироваться в более токсичные соединения [5, 6].

Число трофических уровней в водной цепи питания больше, чем в наземной. Важным элементом пищевой цепи в водных экосистемах являются макрофиты. Так, водорослями и водными растениями

питаются большинство гидробионтов, становящихся, в свою очередь, пищей для рыб. Макрофитами питаются и растительноядные рыбы, которые служат пищей для хищных рыб. Таким образом, тяжелые металлы, поступая в водоем, способны активно включаться в круговорот веществ и мигрировать по пищевым цепям к человеку при употреблении рыбной продукции [7, 8].

Большинство ТМ являются важными для жизни микроэлементами, однако их избыточное поступление в организм человека может приводить к нарушениям метаболизма. Обладая кумулятивными свойствами, ТМ могут проявлять мутагенные, тератогенные и канцерогенные свойства. Последние исследования показали, что связанные с поступлением микроэлементов вредные для здоровья эффекты возникают при более низких, чем предполагалось ранее, уровнях [8]. Так как здоровье человека в определенной степени зависит от факторов среды обитания, с увеличением техногенеза возрастает и актуальность санитарно-гигиенического мониторинга окружающей среды.

Целью исследований являлось изучение влияния объектов горнорудной промышленности на содержание приоритетных ТМ в компонентах речных экосистем.

Объекты и методика исследований

В течение нескольких десятилетий высокому техногенному загрязнению в регионе подвергаются реки Таналык и Карагайлы. Таналык протекает по Баймакскому и Хайбуллинскому административным районам РБ и впадает в р. Урал на территории Оренбургской области. Длина водотока составляет 225 км. В бассейне реки расположено более 10 как разрабатываемых, так и отработанных месторождений. 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 водоохранной зоне реки находятся старое и новое хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики. За пределами города р. Карагайлы впадает в р. Туяляс (Худолаз).

На р. Таналык были исследованы 2 участка:

- в районе загрязнения верхнего течения реки подотвальными водами отработанного серно-колчеданного месторождения Куль-Юрт-Тау, эксплуатировавшегося в 1932–1986 гг. (участок А);
- в районе загрязнения среднего течения реки подотвальными водами Бурибайского медно-колчеданного месторождения и фильтратом хвостохранилищ Бурибаевского горно-обогатительного комбината (ГОК), работающего с 1937 г. (участок Б).

На каждом участке были отобраны пробы воды, донных отложений и растительных образцов. Пробы отбирали выше места впадения стоков (условный контроль), в месте впадения и перемешивания стоков с речной водой и на расстоянии 3 км ниже по течению от места впадения стоков (для оценки самоочищающейся способности водотока).

На р. Карагайлы (участок В) пробы отбирали в верхнем течении реки, не загрязняемом бытовыми и промышленными стоками (условный контроль), в промзоне г. Сибай и за пределами города, в устье реки.

Для изучения накопления ТМ макрофитами был выбран рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.), который является укореняющимся, погруженным в воду растением, обладает способностью развивать высокую биомассу побегов и служит пищей для гидробионтов. Одновременно с растительными образцами с глубины 0–20 см отбирали донные отложения, которые впоследствии анализировались на содержание подвижных форм тяжелых металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8. 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

В целом для створов характерен следующий убывающий ряд металлов в речных компонентах: $Zn > Cu > Cd$. Лишь в донных отложениях на участке Б содержание меди больше, чем цинка (табл.).

Сравнение полученных данных с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [9] показало, что на участке А превышения нормативов не наблюдается. На участке Б содержание цинка и меди было в пределах нормы, в то время как содержание кадмия превышало ПДК от 5 до 22 раз. В устье р. Карагайлы и в промзоне г. Сибай показатели кадмия в воде выше норматива от 8 до 12 раз. Концентрация цинка в промзоне г. Сибай достигает 6 ПДК.

Содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях на участках (X±Sx)

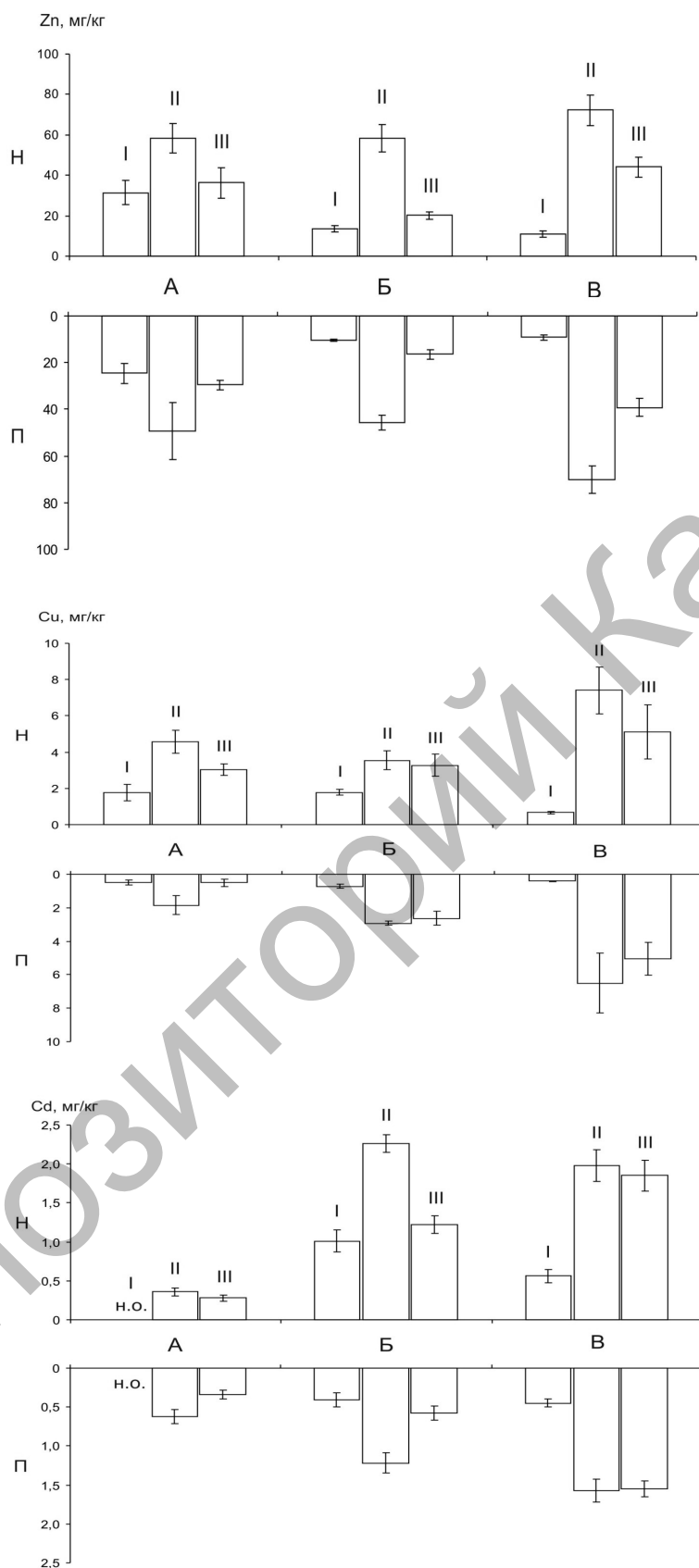
ТМ	Выше впадения стоков	Место впадения стоков	Ниже впадения стоков
Участок А			
Zn	$\frac{0,03 \pm 0,01}{3,70 \pm 0,43}$	$\frac{0,14 \pm 0,02}{12,97 \pm 2,06}$	$\frac{0,10 \pm 0,02}{8,19 \pm 0,67}$
Cu	$\frac{0,014 \pm 0,002}{0,84 \pm 0,07}$	$\frac{0,030 \pm 0,006}{3,10 \pm 0,08}$	$\frac{0,020 \pm 0,004}{1,62 \pm 0,07}$
Cd	$\frac{н.о.}{0,005 \pm 0,0004}$	$\frac{0,0001}{0,02 \pm 0,0035}$	$\frac{0,0001}{0,03 \pm 0,003}$
Участок Б			
Zn	$\frac{0,02 \pm 0,004}{0,93 \pm 0,12}$	$\frac{0,60 \pm 0,036}{11,38 \pm 2,28}$	$\frac{0,24 \pm 0,022}{4,39 \pm 0,34}$
Cu	$\frac{0,002 \pm 0,0002}{2,70 \pm 0,24}$	$\frac{0,090 \pm 0,0038}{26,22 \pm 4,84}$	$\frac{0,080 \pm 0,0032}{22,34 \pm 3,33}$
Cd	$\frac{0,005 \pm 0,0002}{0,0002 \pm 0,00004}$	$\frac{0,022 \pm 0,0034}{0,0802 \pm 0,0054}$	$\frac{0,021 \pm 0,0028}{0,0005 \pm 0,0001}$
Участок В			
Zn	$\frac{0,08 \pm 0,01}{4,26 \pm 1,49}$	$\frac{6,32 \pm 0,77}{1,26 \pm 0,29}$	$\frac{0,12 \pm 0,02}{5,84 \pm 1,02}$
Cu	$\frac{0,004 \pm 0,001}{0,60 \pm 0,18}$	$\frac{0,005 \pm 0,001}{0,38 \pm 0,08}$	$\frac{0,007 \pm 0,001}{2,92 \pm 0,21}$
Cd	$\frac{0,0007 \pm 0,0001}{0,01 \pm 0,002}$	$\frac{0,012 \pm 0,001}{0,008 \pm 0,002}$	$\frac{0,008 \pm 0,001}{0,13 \pm 0,01}$

Примечание. В числителе — в воде, мг/дм³, в знаменателе — в донных отложениях, мг/кг; н.о. — не обнаружено.

Сопоставление показателей ТМ с нормативами для водоемов рыбохозяйственного значения [10] показало, что уровень цинка и меди во всех точках отбора превышает ПДК: от 2 до 60 раз по цинку и от 2 до 90 раз по меди. Экстремально высокие показатели цинка в воде р. Карагайлы в черте г. Сибай — до 632 ПДК. Повышенные концентрации данных металлов в контрольных створах участков А и В, вероятно, связаны с особенностями естественного геохимического фона региона, а на участке Б — с фоновым загрязнением, так как выше п. Бурибай вдоль р. Таналык расположен ряд действующих и отработанных месторождений. Показатели кадмия в воде во всех створах участка А и в фоновых створах участков Б и В в пределах нормы. В районе загрязнения реки промышленными объектами Бурибаевского ГОК наблюдается превышение ПДК до 4 раз, в промзоне г. Сибай — до 2,5 раза.

Так как в Российской Федерации норматива по содержанию ТМ в донных отложениях не имеется, для оценки уровня загрязненности грунтов часто используют сравнение полученных массовых концентраций ТМ со значением величин кларка, фоновыми концентрациями или официально установленными допустимыми уровнями. Мы руководствовались перечнем ПДК для почв [11]. Содержание подвижных форм цинка в грунте исследованных участков не превышало ПДК. В районе Бурибаевского месторождения в донных отложениях концентрация меди была на уровне 7–9 ПДК. Следует отметить, что на участках, где производился отбор проб, грунт представлял собой илисто-песчаную массу. Невысокое накопление тяжелых металлов, видимо, связано с низкой поглотительной способностью песчаной фракции.

Химический состав растений отражает элементный состав среды роста [12]. В укореняющихся макрофитах уровень концентрации металлов зависит от их содержания в воде и донных отложениях, а также степени доступности растениям и физиологической роли элемента. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил достоверность влияния степени загрязнения на накопление цинка, меди и кадмия рдестом блестящим (рис.). Так, содержание цинка и меди в надземной и подземной фитомассе рдеста по сравнению с контролем повышается до 2 раз на участке А и до 4 раз на участке Б. На участке В концентрация цинка повышается до 7 раз, меди — до 16 раз, кадмия — до 3,5 раза. В растительных образцах с контрольной точки участка А кадмия не обнаружено, во всех других точках его содержание в корнях варьирует от 0,34 мг/кг до 1,57 мг/кг, в надземных органах — от 0,28 мг/кг до 2,26 мг/кг воздушно-сухого веса.



А, Б, В — участки; I — условный контроль;
 II — место впадения загрязненных стоков; III — ниже впадения загрязненных стоков;
 Н — в надземной фитомассе; П — в подземной фитомассе; н.о. — не обнаружено

Рис. Содержание тяжелых металлов в фитомассе редста блестящего на участках

Створы, расположенные ниже по течению от места впадения загрязненных притоков, позволяют оценить самоочищающуюся способность рек. Как видно из полученных данных, р. Карагайлы не успевает очиститься до впадения в р. Туяляс, а на участках р. Таналык содержание ТМ в воде и донных отложениях 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.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что объекты горнопромышленного комплекса являются источниками загрязнения поверхностных водоемов тяжелыми металлами. При этом экологическая ситуация осложняется наложением техногенного загрязнения металлами на общий повышенный геохимический фон их содержания в окружающей среде, обусловленный рудной минерализацией. Выявленные превышения нормативов как для водных объектов рыбохозяйственного значения, так и хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования свидетельствуют о потенциальной опасности водоемов состоянию здоровья населения региона.

Список литературы

- 1 *Опекунов А.Ю.* Аквальный техноседиментогенез // Тр. ВНИИ Океангеологии Министерства природных ресурсов РФ. — СПб.: Наука, 2005. — Т. 208. — 278 с.
- 2 *Валеев Т.К., Сулейманов Р.А., Егорова Н.Н., Даукаев Р.А., Рахматуллин Н.Р., Аллаярова Г.Р.* Материалы эколого-гигиенических исследований качества водных объектов на территориях горнорудного района // Вода: химия и экология. — 2015. — № 3. — С. 30–33.
- 3 *Бактыбаева З.Б., Суяндукоев Я.Т., Ямалов С.М., Юнусбаев У.Б.* Загрязнение тяжелыми металлами экосистемы реки Таналык, сообщества водных макрофитов и возможности их использования для биологической очистки / Под ред. чл.-кор. АН РБ Б.М.Миркина. — Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. — 208 с.
- 4 *Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г.* Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала / Отв. ред. чл.-кор. РАН В.Н.Пучков. — Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. — 420 с.
- 5 *Патина Т.С.* Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем: анализ. обзор / ГПНТБ СО РАН, ИВЭП СО РАН. — Новосибирск, 2001. — 58 с.
- 6 *Horowitz A.J.* A primer on trace metal-sediment chemistry. — Alexandria, 1985. — 67 p.
- 7 *Перевозчиков М.А., Богданова Е.А.* Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах. — СПб.: ГосНИОРХ, 1999. — 227 с.
- 8 *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation / Edited by M.N.V.Prasad, Kenneth S.Sajwan, Ravi Naidu.* — Boca Raton: CRC/Taylor and Francis, 2005. — 744 p.
- 9 ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования».
- 10 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» // [ЭР]. Режим доступа: <http://rg.ru/2010/03/05/voda-dok.html>.
- 11 ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве». — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. — 3 с.
- 12 *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. — М.: Мир, 1989. — 439 с.

З.Б.Бактыбаева, Р.А.Сулейманов, М.А.Мұқашева,
Т.К.Валеев, Н.Р.Рахматуллин, А.А.Кулагин

Башқұртстан Республикасының таулы территориясындағы өзен экожүйелерінің компоненттері құрамындағы ауыр металдар мөлшерінің экологиялық бағасы

Мақалада өндірісі дамыған аймақтардағы су нысандарының ластануы бірінші және екінші ретті бактериалдық және химиялық жүктемелерге байланысты, олар суқоймалардың тікелей және жанама қауіптіліктерін қалыптастырады. Тазаланбаған және жеткіліксіз тазаланған ағын суларды шығару су қоймасына бірінші ретті жүктемені анықтайды, олардың құрамындағы ауыр металдар денсаулыққа

тікелей улы қауіптілік туғызады. Башқұртстан Республикасының тау-кен өндіріс кешендері объектілерінің әсерінен ластанған судың, тұнбалардың және жылтыр рдест фитомассасының (*Potamogeton lucens* L.) құрамындағы ауыр металдарды (Zn, Cu және Cd) зерттеу нәтижелері қарастырылған. Ластану градиенті бойынша құрамындағы металдардың деңгейі жоғары екені көрсетілген.

Z.B.Baktybaeva, R.A.Suleimanov, M.A.Mukasheva,
T.K.Valeev, N.R.Rakhmatullin, A.A.Kulagin

Ecological evaluation of the content heavy metals in river ecosystem components of mining territory Republic of Bashkortostan

Pollution of water bodies in areas with developed industry due to primary and secondary load, both bacterial and chemical that generates immediate and potentially danger for reservoirs. The issue of untreated or inadequately treated sewage detects the primary load on the pond, direct toxic hazards to health caused mainly by heavy metals. The results of the study of heavy metals (Zn, Cu and Cd) in water, sediments and biomass of *Potamogeton lucens* L. in the zone of influence of objects of the mining complex of Bashkortostan. It is shown that the contamination occurs along the gradient of increasing levels of metals.

References

- 1 Opekunov A.Yu. *Works of VNIIOkeangeologia of Ministry of Natural Resources*, Saint Petersburg: Nauka, 2005, 208, 278 p.
- 2 Valeev T.K., Suleimanov R.A., Egorova N.N., Daukaev R.A., Rakhmatullin N.R., Allayarova G.R. *Water: chemistry and ecology*, 2015, 3, p. 30–33.
- 3 Baktybaeva Z.B., Suyundukov Ya.T., Yamalov S.M., Yunusbaev U.B. *Heavy metal pollution of the river ecosystem Tanalyk, communities of aquatic weeds and the possibility of the use-education for biological treatment*, Ed. by corr. Academy of Sciences of Belarus B.M.Mirkin, Ufa: Academy of Sciences of Belarus, Gilem, 2011, 208 p.
- 4 Abdрахманов R.F., Попов V.G. *Geochemistry and formation of underground waters of the Southern Urals*, Ed. by corr. RAS V.N.Puchkov, Ufa: Academy of Sciences of Bashkortostan, Gilem, 2010, 420 p.
- 5 Papina T.S. *Transport and distribution characteristics of heavy metals in the series: water – suspended matter – sediments of river ecosystems*: Analit. review, SPSTL; IWEP SB RAS, Novosibirsk, 2001, 58 p.
- 6 Horowitz A.J. *A primer on trace metal-sediment chemistry*, Alexandria, 1985, 67 p.
- 7 Perevoznikov M.A., Bogdanova E.A. *Heavy metals in freshwater ecosystems*, Saint Petersburg: GosNIORH, 1999, 227 p.
- 8 *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*, Ed. by M.N.V.Prasad, Kenneth S.Sajwan, Ravi Naidu, Boca Raton: CRC/Taylor and Francis, 2005, 744 p.
- 9 SN 2.1.5.1315-03 «Maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in water bodies drinking and cultural and community water use».
- 10 Order of the Federal Agency for Fisheries of January 18, 2010 № 20 «On approval of standards for water quality fishery water bodies, including the maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies.», <http://rg.ru/2010/03/05/voda-dok.html>.
- 11 SN 2.1.7.2041-06 maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in the soil, Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2006, 3 p.
- 12 Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace elements in soils and plants*, Moscow: Mir, 1989, 439 p.