

ПРОБЛЕМЫ УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ МЫШЬЯКА ИЗ ПРИРОДНЫХ ВОД В ПРОЦЕССЕ БАРОМЕМБРАННОЙ ОБРАБОТКИ

Л.А. Мельник, Ю.В. Бабак, В.В. Гончарук

Институт коллоидной химии и химии воды
им. А.В. Думанского НАН Украины, г. Киев

Поступила 08.07.2011 г.

Приведен обзор современных научных исследований влияния соединений мышьяка на здоровье человека и распространения их в природных и питьевых водах. Рассмотрены проблемы удаления мышьяка в процессе баромембранного опреснения природных вод.

Ключевые слова: мышьяк, обратноосмотическое удаление, природные воды, распространение и влияние на человека.

Введение. В последнее десятилетие проблема загрязнения подземных вод соединениями мышьяка приобрела глобальные масштабы, и в настоящее время мышьяк рассматривается как наиболее серьезное и опасное неорганическое загрязнение питьевой воды [1, 2].

Хотя токсичность соединений мышьяка известна очень давно, влияние следовых количеств этого элемента на здоровье человека при продолжительном употреблении с питьевой водой установлено лишь недавно. Так, в 1983 г. впервые в Индии были выявлены случаи вызванных мышьяком поражений кожи у пациентов из Западной Бенгалии. В 1987 г. зафиксировано несколько случаев поражений у пациентов из соседней Бангладеш. Характерными признаками поражения кожи являлись изменения в пигментации, главным образом в верхней части грудной клетки, на руках и ногах, а также кератозы ладоней рук и подошв ног. Поэтому при содействии ВОЗ были проанализированы источники воды, которую использовали пациенты. Выявленные высокие концентрации соединений мышьяка в этих источниках подтвердили диагноз заболеваний обусловленных мышьяком [3].

Следует отметить, что проникновение мышьяка в организм человека через кожу минимально. Поэтому, например, мытье рук или стирка одежды и купание в воде, которая содержит мышьяк, а также работа на рисовых полях, орошаемых водой, содержащей мышьяк, не представляют серьезной опасности для здоровья человека.

Через пищевую цепь попадание мышьяка в организм ограничено, хотя вопрос абсорбции мышьяка сельскохозяйственными культурами, полив которых осуществляется водой, содержащей его в высокой концентрации, требует дополнительного изучения.

Наибольшую угрозу для здоровья людей мышьяк представляет своим присутствием в питьевой воде [1, 3]. Обычно это обнаруживается при продолжительном потреблении воды, которая содержит неорганические формы мышьяка в незначительных концентрациях. Подобным влиянием мышьяка обусловлен ряд хронических заболеваний: онкологические болезни мочевого пузыря, почек и легких, болезни кровеносных сосудов, нижних конечностей, ступней и кожи, а также, возможно, диабет, гипертензия, репродуктивные расстройства и нарушения умственного развития детей. Признаки отравления мышьяком при употреблении питьевой воды с повышенным содержанием этого элемента обычно обнаруживаются в период от 5 до 20 лет, причем некоторые последствия влияния мышьяка необратимы.

Приблизительно один человек из 100, которые в течение продолжительного периода потребляют воду с содержанием мышьяка $0,05 \text{ мг/дм}^3$, может умереть от онкологического заболевания. Это количество достигает 10% в тех случаях, когда концентрация мышьяка превышает $0,05 \text{ мг/дм}^3$ [4].

Опираясь на новейшие данные о канцерогенности и генотоксичности соединений мышьяка, ВОЗ в 1993 г. снизила ПДК мышьяка в питьевой воде с 50 до 10 мкг/дм^3 [5 – 67]. До 10 мкг/дм^3 была также снижена ПДК мышьяка в питьевой воде в странах ЕС и Японии [1]. В 2001 г. указанный норматив был принят Агентством охраны окружающей среды США [8]. Новый Государственный стандарт Украины "Питьевая вода. Требования и методы контроля качества" [9] также нормирует содержание мышьяка в системах централизованного питьевого водоснабжения на уровне $0,01 \text{ мг/дм}^3$.

Предполагается, что в связи со снижением допустимого уровня мышьяка в питьевой воде только в США около 3000 – 4000 систем водоснабжения, обслуживающих 11 миллионов человек, имеют потребность в усовершенствовании [2, 10, 11]. В подавляющем большинстве этих систем используется подземная вода. В Бангладеш и других регионах индийского континента через загрязнение подземных питьевых вод около 70 млн. населения подвергаются отравляющему влиянию мышьяка.

Мышьяк встречается в природе повсюду – в минералах, горных породах, почве, воде, растениях и животных, недаром его называют "вездесущим". Мышьяк легко мигрирует, чему оказывает содействие довольно высокая растворимость некоторых его соединений в воде. Во влажном климате мышьяк вымывается из грунта и относится грунтовыми водами,

а потом – реками. Средняя концентрация мышьяка в реках – 3, в поверхностных водах – ~ 10, в воде морей и океанов – ~ 1 мкг/дм³. Это объясняется сравнительно быстрым осаждением его соединений из воды и накоплением в донных отложениях, например в железомарганцевых конкрециях.

В грунтах содержание мышьяка составляет обычно от 0,1 до 40 мг/кг. Но в области залегания мышьяковых руд, а также в вулканических районах в грунте может содержаться очень много мышьяка (до 8 г/кг), как, например, в некоторых районах Швейцарии и Новой Зеландии. В таких местах гибнет растительность, а животные болеют.

Диапазон концентраций мышьяка в природных водах огромный и составляет 0,5 – 5000 мкг/дм³ [1]. Типичная концентрация его в пресной воде составляет 10, реже – до 1 мкг/дм³. Иногда пресные воды, в основном подземные, содержат более высокие концентрации мышьяка (> 50 мкг/дм³).

Природные воды с повышенным содержанием мышьяка выявлены во многих регионах мира: Юго-Восточная Азия (Бангладеш, Вьетнам, Непал, Камбоджа, Монголия, Китай, Тайланд, Пакистан, Тайвань); центральная и Южная Америка (Аргентина, Чили, Мексика); Северная Америка (США, Канада); Австралия; Европа (Финляндия, Венгрия, Германия, Хорватия, Румыния, Италия, Испания, Греция) [12]. Максимальное содержание мышьяка (15000 мкг/дм³) наблюдается в подземном геотермальном источнике в восточной части США [13]. В значительных количествах он содержится в некоторых минеральных водах. Так, например, в бутилированной воде Рогаска (Словения) концентрация мышьяка составляет ~ 60 мкг/дм³ [14]. В минеральных водах Закарпатья (села Квасы, Верхний - Быстрый, Говерла) концентрация мышьяка достигает 1,5 – 2,0 мг/дм³ [15].

Согласно международным нормативным документам [16, 17] и нормативным документам Украины [18] природная минеральная вода должна содержать не более 10 мкг/дм³ мышьяка.

Широкое распространение соединений мышьяка в природных водах связано как с природными факторами, так и с антропогенным влиянием [1, 5, 8, 13, 14].

Заметный вклад в загрязнение подземных вод соединениями мышьяка вносит природное геохимическое выщелачивание грунтов. Мышьяк попадает в водоносные горизонты в результате растворения минеральных веществ и руд, что в некоторых районах приводит к его значительной концентрации в грунтовых водах.

Основными антропогенными источниками поступления соединений мышьяка в природные воды являются: шахтная индустрия, фармацевтическая промышленность, предприятия по производству стекла и керамики, пестицидов, гербицидов, красок, деревообрабатывающие (использу-

ющие соединения мышьяка для консервации дерева), нефтеперерабатывающие предприятия, а также предприятия по выплавке металлов, сплавов и др. [5, 13, 14].

Следует отметить, что соединения мышьяка применяют и как антисептики для консервации и предотвращения от порчи кож, мехов и чул, для пропитки древесины и как компонент необрастающих красок для днищ судов. В этом качестве используют соли мышьяковой и мышьяковистой кислот. Кроме того, соединения мышьяка используют для борьбы с насекомыми, грызунами, а также с сорняками. Раньше такое применение было широко распространено, особенно при обработке фруктовых деревьев, табачных и хлопковых плантаций, однако из-за ядовитости соединений мышьяка их использование в сельском хозяйстве в настоящее время ограничено.

Важные области применения соединений мышьяка – производство полупроводниковых материалов и микросхем, волоконной оптики, выращивание монокристаллов для лазеров, пленочная электроника. Ежегодно в мире промышленно производится свыше 60000 т соединений мышьяка.

Мышьяк в природных водах находится в основном в виде неорганических форм As (III) и As (V), соотношение между которыми обуславливается окислительно-восстановительным потенциалом и рН среды [19].

Поверхностные воды могут содержать также невысокие, однако обнаруживаемые (от 10 до 60% от общего количества мышьяка) концентрации мышьяка в виде органических форм, таких, как монометиларсенаты (ММА) и диметиларсенаты (ДМА) [5, 20]. Указанные соединения, а также производные фенилмышьяковой кислоты используются в сельском хозяйстве и могут загрязнять сельскохозяйственные сточные воды. В некоторых озерах ММА являются доминирующими формами мышьяка, и их концентрация существенно изменяется в зависимости от сезона, как результат биологической активности воды [5].

Соединения As (III) в 60 раз токсичнее As (V) [2, 21], в то время как органические соединения мышьяка гораздо менее токсичны, чем неорганические [22]. Следует, однако, отметить, что полученные в [20] данные свидетельствуют о канцерогенной способности метилорганических соединений мышьяка, особенно ДМА.

В атмосферных или более окислительных условиях доминирующей формой мышьяка в воде является As (V). В средневосстановительной среде наиболее термодинамически стабильным является As (III). В большинстве загрязненных мышьяком подземных вод соединения As (III) и As (V) присутствуют одновременно. Согласно [23] в подземных водах, являющихся основным источником питьевой воды во всем мире, около 67 – 99% от общего количества мышьяка представлено As (III).

Важно отметить, что в организме человека соединения As (V) легко восстанавливаются до As (III). Поэтому хроническая токсичность потребляемой внутрь питьевой воды не зависит от соотношения окисленной и восстановленной форм мышьяка. Из этого также вытекает, что, вопреки существующему мнению [2], обработка питьевой воды, которая приводит к простой конверсии As (III) до As (V), не снижает токсичность этой воды.

Соединения As (III) в воде присутствуют обычно в форме слабой мышьяковистой кислоты H_3AsO_3 ($pK_a = 9,22$), а соединения As (V) – в форме более сильной мышьяковой кислоты H_3AsO_4 ($pK_a = 2,20$) и ее анионов $H_2AsO_4^-$ и $HAsO_4^{2-}$. Таким образом, в воде в интервале pH 4 – 10 соединения As (III) не заряжены, а соединения As (V) заряжены отрицательно. Наличие заряда в нейтральной и слабощелочной областях способствует более эффективному извлечению соединений As(V) в процессах очистки воды по сравнению с As (III) [5, 19]. Соотношение между различными формами мышьяка в природной воде в зависимости от pH приведено в [19, 18, 24].

Широкая распространенность соединений мышьяка в природных водах, а также обнаруженная их высокая опасность для здоровья человека при сравнительно невысоких концентрациях в питьевой воде обуславливают актуальность исследований по разработке эффективных и экономически целесообразных методов очистки воды от соединений данного элемента. В настоящее время проводятся интенсивные лабораторные и полевые испытания в этом направлении. Опубликовано большое количество работ по извлечению соединений мышьяка из питьевых вод методами коагуляции в сочетании с фильтрацией и микрофильтрацией [25 – 30], реагентного или каталитического окисления с последующей коагуляционной или сорбционной обработкой [31– 35], сорбции и др. [36 – 58].

Цель данной работы – анализ имеющихся данных о возможности удаления соединений мышьяка из природных вод в процессе их баромембранного опреснения, поскольку нанофильтрация и обратный осмос в последние десятилетия очень широко используются как самостоятельные методы для получения питьевой воды из солоноватых подземных вод.

В процессе обратного осмоса степень извлечения основных компонентов воды может превышать 99%, и полученная вода по всем основным показателям соответствует качеству питьевой воды. В то же время степень извлечения микрокомпонента бора, присутствующего в природных водах в виде слабой кислоты (подобно As (III)), при баромембранном опреснении в традиционных условиях не превышает 30 – 70% [59]. Это вызывает необходимость дополнительной обработки пермеата с целью его кондиционирования по содержанию бора.

Проведенный анализ специальной литературы показал, что задерживающая способность обратноосмотических и нанофильтрационных мемб-

ран в отношении As (III) в традиционных условиях также недостаточно высока [5, 19, 60 – 66]. Например, в [19] показано, что коэффициент извлечения арсената с использованием мембран ES-10 и NTR-789 HF ("Nitto Electric Industrial Co", Япония) достигает около 95% при pH 5; 7 и 10. Удаление арсенита с использованием мембраны ES-10 составляет 75% при pH 5 и 7 и увеличивается до 90% лишь при pH 10. Степень извлечения арсенита с использованием мембраны NTR -729 HF составляет около 20% в интервале pH 3 – 7. При повышении pH до 10 этот показатель возрастает до 43%. Увеличение задерживания арсенита в щелочной среде объясняется усилением диссоциации слабой мышьяковистой кислоты и переходом ее в ионизированную форму.

В [63] сообщается, что при использовании ароматической полиамидной мембраны ES-10 коэффициент задерживания арсенита (концентрация As в исходном растворе – 200 мкг/дм³) составляет 50% при pH 3 – 6 и 89% – при pH 10. При использовании поливинилспиртовых мембран NTR-729 HF коэффициенты задерживания арсенита при pH 7 и 10 составляют соответственно 50 и 80%, а при использовании поливинилспиртовой мембраны NTR-7250 – 30 и 60%.

Эффективность извлечения As (V) из модельного раствора в зависимости от концентрации, рабочего давления, степени отбора пермеата и температуры при использовании тонкопленочной композитной полиамидной мембраны 192-NF 300 производства "Osmonics Inc" изучена в [61]. Установлено, что задерживание As (V) этой мембраной составляет 93 – 99% при концентрации мышьяка в исходной воде 100 – 382 мкг/дм³. С повышением концентрации мышьяка в начальном растворе коэффициент задерживания As (V) увеличивается. Концентрация мышьяка в пермеате снижается до 5 мкг/дм³. Показано, что повышение рабочего давления от 300 до 700 кПа и температуры от 10 до 25°C практически не влияет на степень удаления мышьяка.

В [62] исследован процесс извлечения арсенитов и арсенатов из воды с использованием полиамидной тонкопленочной композиционной нанофильтрационной мембраны NF-45 ("FilmTec", "Minnetonka", MN). Показано, что при pH 8,1 степень извлечения арсената возрастает от 60 до 90% при повышении концентрации As (V) в растворе от 10 до 316 мкг/дм³. Степень извлечения арсенита в этих условиях значительно ниже и с повышением концентрации арсенита от 10 до 100 мкг/дм³, наоборот, снижается с 20 до 7%. Изменение pH воды в интервале 4 – 8 практически не влияет на эффективность извлечения арсенита, который в этих условиях находится в недиссоциированной форме.

В [64] показано, что при использовании обратноосмотической мембраны на основе триацетата целлюлозы HR3155 ("Toyobo Co, Ltd") коэффициент задерживания арсената превышает 95% при рабочем давлении

4,0 МПа, в то время как степень извлечения арсенита в этих же условиях достигает лишь 55%.

В [5] сообщается, что удаление арсената в процессе испытания пилотных обратноосмотических установок с использованием различных типов мембран составляет 88 – 99%, в то время как удаление арсенита – лишь 5 – 84%. Отмечается также, что задерживание As (III) существенно увеличивается в сильнощелочной среде.

Рабочее давление мало влияет на эффективность извлечения соединений мышьяка обратноосмотическими и нанофильтрационными мембранами [61, 64, 65]. Согласно [65] при повышении давления от 0,3 до 1,1 МПа задерживание соединений мышьяка коммерческими мембранами ES-10, NTR-729HF и NTR-7250 увеличивается лишь на 4%. Коэффициент задерживания арсенат- и арсенит-ионов при 1,0 МПа и pH 6,8 для указанного ряда мембран составляет соответственно 97; 94; 82 и 75; 22; 10%.

Таким образом, как свидетельствуют изложенные выше данные, использование метода обратного осмоса и нанофильтрации в традиционных условиях (без подщелачивания исходной воды до pH 10) не обеспечивает снижения концентрации As (III) в обрабатываемом растворе до ПДК для питьевой воды. Это обуславливает необходимость дополнительной обработки пермеатов обратноосмотических и нанофильтрационных установок с целью кондиционирования по содержанию мышьяка.

В связи с этим, а также учитывая, что арсенит доминирует в подземных водах [23], актуальной является разработка альтернативных способов (кроме подщелачивания раствора) повышения задерживания As (III) мембранами в процессе баромембранного опреснения с целью исключения или уменьшения затрат на кондиционирование пермеата.

Выводы. Проведенный анализ литературных данных свидетельствует о том, что соединения мышьяка часто встречаются в природных водах, что обусловлено как природными причинами, так и антропогенным влиянием. В подземных водах мышьяк находится в основном в виде мышьяковистой кислоты H_3AsO_3 , которая практически во всем интервале pH (вплоть до 10) не диссоциирована. Это является причиной низкого извлечения мышьяка в процессе традиционного баромембранного опреснения и не позволяет снизить концентрацию арсенита в пермеате до ПДК для питьевой воды. Превышение концентрации As в питьевой воде 10 мкг/дм^3 создает серьезную угрозу здоровью населения. Показана необходимость дополнительной обработки пермеатов обратноосмотических и нанофильтрационных установок с целью кондиционирования по содержанию мышьяка.

Резюме. Наведено огляд сучасних наукових досліджень щодо поширення сполук миш'яку в природних і питних водах, їхнього впливу на здоров'я людини. Розглянуто проблеми, що виникають при баромемб-

ранному опрісненні вод, що містять миш'як, з метою одержання води питної якості.

L.A. Melnyk, Yu.V. Babak, V.V. Goncharuk

THE PROBLEMS OF AS COMPOUNDS REMOVAL DURING BAROMEMBRANE TREATMENT OF NATURE WATER

Summary

The review of modern scientific researches concerning of distribution of arsenic compounds in natural and drinking waters and their influence on public health is presented. The problems arising at production of drinking water during baromembrane desalination of arsenic-containing natural waters were considered.

Список использованной литературы

- [1] *Smedley D.G., Kinniburgh D.G.* // *Appl. Geochem.* – 2002. – **17**, N 5. – P. 517 – 568.
- [2] *DeMarco M.J., SenGupta A.K., Greenleaf J.E.* // *Water Res.* – 2003. – **37**, N1. – P.164 – 176.
- [3] ВОЗ. Уменьшение содержания мышьяка в целях обеспечения безопасности грунтовых вод / Доклад Секретариата от 25 мая 2006 г. – 7 с.
- [4] *Smith A.H., Lingas E.O., Rahman M.* // *Bull. World Health Organization.* – 2000. – **78**, N 9. – P.1093 – 1103.
- [5] *Ning R. Y.* // *Desalination.* – 2002. – **143**, N 3. – P. 237 – 241.
- [6] *WHO.* A field guide for detection, surveillance and management of arsenicosis. Региональное бюро ВОЗ для стран Юго-Восточной Азии, Дели, 2004 г.
- [7] *Gomez-Caminero A.* Arsenic and arsenic compounds. *Environmental Health Criteria 224*, second edition. – Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2001.
- [8] *US EPA,* National Primary Drinking Water Regulations; Arsenic and Clarifications to Compliance and New Source Contaminants Monitoring; Final Rule. *Federal Register.* Vol. 66, No. 14, January 22, 2001. – P. 6975 – 7066.
- [9] *Гончарук В.В.* // *Химия и технология воды.* – 2010. – **32**, № 5. – С. 463 – 512.
- [10] *Bianchelli T.* Arsenic Removal from Drinking Water, NOVA, 2003.
- [11] *US Environmental Protection Agency,* Arsenic in Drinking Water Rule, Economic Analysis, EPA Dokument 815-R-00-026, Washington, DC, USA, 2000.
- [12] *Biterna M., Arditoglou A., Tsikouras E., Voutsas D.* // *J. Hazard. Materials.* – 2007. – **149**, N 3. – P. 548 – 552.

- [13] *Ergican E., Gecol H., Fuchs A.* // *Desalination*. – 2005. – **181**. – P. 9 – 26.
- [14] *Eleren J. T., Stibilj V., Slejkovec Z.* // *Water Res.* – 2002. – **36**. – P. 2967 – 2974.
- [15] *Природа Закарпатської області / За ред. К.І. Геренчука.* — Львів: Вища шк., 1981. – 156 с.
- [16] *Commission Directive 2003/40/EC of 16 May 2003//Official Journal of the European Union.* – L126. – P. 34 – 39.
- [17] *The Natural Mineral Water, Spring Water and Bottled Drinking Water (England) Regulation 2007.* – Food Standards Agency, 2007, N 2785. – 32 p.
- [18] *Постанова Головного державного санітарного лікаря України "Про затвердження гігієнічних нормативів щодо безпечності природної мінеральної води" від 30.01.2010, № 4.*
- [19] *Kang M., Kawasaki M., Tamada S., Kamei T., Magara Y.* // *Desalination*. – 2000. – **131**. – P. 293 – 298.
- [20] *Nakajima T., Xu Y.H., Mori Y., Kishita M., Takanashi H., Maeda S., Ohki A.* // *J. Hazard. Materials*. – 2005. – N1/3. – P. 75 – 80.
- [21] *Ferguson J.F., Gavis J.* // *Water Res.* – 1972. – **6**. – P. 1259 – 1274.
- [22] *Neff J.M.* // *Environ. Toxicol. Chem.* – 1997. – **16**, N5. – P. 917 – 927.
- [23] *Smedley P., Nicolli H.B., Macdonald D.M.J., Barros A.J., Tullio J.O.* // *Appl. Geochem.* – 2002. – **17**, N 3. – P. 259 – 284.
- [24] *Welch A.H., Westjohn D.B., Helsel D.R., Wanty R.B.* // *Ground Water*. – 2000. – **38**, N 4. – P. 589 – 604.
- [25] *Chwirka J.D., Colvin C., Gomez J.D., Mueller P.A.* // *J. Amer. Water Works Assoc.* – 2004. – **96**, N 3. – P. 106 – 114.
- [26] *Ghurye G., Clifford D., Tripp A.* // *Ibid.* – 2004. – **96**, N 4. – P. 143 – 152.
- [27] *Meng X., Bang S., Korfiatis G.P.* // *Water Res.* – 2000. – **34**, N 4. – P. 1255 – 1261.
- [28] *Liu R.P., Li X., Xia S.J., Yang Y.L., Wu R.C., Li G.B.* // *Water Environ. Res.* – 2007. – **79**. – P. 2260 – 2264.
- [29] *Jia Y.F., Demopoulos G.P.* // *Water Res.* – 2008. – **42**. – P. 661 – 668.
- [30] *Wickramasinghe S.R., Han B., Zimbron J., Shen Z., Karim M.N.* // *Desalination*. – 2004. – **169**. – P. 231 – 244.
- [31] *Kim M.-Jin, Nriagu J.* // *Sci. Total Environ.* – 2000. – **247**, N1. – P. 71 – 79.
- [32] *Lee Y., Um I.K., Yoon J.* // *Environ. Sci. Technol.* – 2003. – **37**. – P. 5750 – 5756.
- [33] *Guan X.H., Ma J., Dong H.R., Jiang L.* // *Water Res.* – 2009. – **43**, N 20. – P. 5119 – 5128.
- [34] *Guan Xiaohong, Dong Haoran, Ma Jun, Jiang Li.* // *Ibid.* – 2009. – **43**. – P. 3891 – 3899.
- [35] *Zhang F.S., Itoh H.* // *Chemosphere*. – 2006. – **65**, N 1. – P. 125 – 131.
- [36] *Dutta P.K., Ray A.K., Sharma V.K., Millero F.J.* // *J. Colloid and Interface Sci.* – 2004. – **278**, N2. – P. 270 – 275.
- [37] *Bang S., Patel M., Lippincott L., Meng X.* // *Chemosphere*. – 2005. – **60**, N 3. – P. 389 – 397.
- [38] *Стрелко В.В., Чубарь Н.И.* // *Химия и технология воды*. – 2000. – **22**, № 1. – С. 74 – 90.

- [39] *Elizalde-Gonzales M.P., Mattusch J., Einicke W.-D., Wenrich R.* // Chem. Eng. J. – 2001. – **81**, N 1/3. – P. 187 – 195.
- [40] *Dambies L., Guibal E., Roze A.* // Colloids and Surfaces, A. – 2000. – **170**, N 1. – P. 19 – 31.
- [41] *Ouvrard S., Donato P., Simonnot M.O., Begin S. et al.* // Cheochim. et Cosmochim. Acta. – 2005. – **69**, N 11. – P. 2715 – 2724.
- [42] *Manning B.A., Fendorf S.E., Bostick B., Suarez D.L.* // Environ. Sci. Technol. – 2002. – **36**, N5. – P. 976 – 981.
- [43] *Chang Y.Y., Song K.H., Yang J.K.* // J. Hazard. Materials. – 2008. – **150**. – P. 565 – 572.
- [44] *Smith S.D., Edwards M.* // J. Water Supply: Res. and Technol. -AQUA. – 2005. – **54**, Issue 4. – P. 201 – 211.
- [45] *Daus B., Wennrich R., Weiss H.* // Water Res. – 2004. – **38**. – P. 2948 – 2954.
- [46] *Goldberg S., Johnston C.T.* // J. Colloid and Interface Sci. – 2001. – **234**. – P. 204 – 216.
- [47] *Zhang Q. Li., Lin Y.C., Chen X., Gao Nai Yun* // J. Hazard. Materials. – 2007. – **148**. – P. 671 – 678.
- [48] *Rau I., Gonzalo A., Valiente M.* // Reactive and Functional Polimers. – 2003. – **54**, N 1/3. – P. 85 – 94.
- [49] *Mondal P., Majumder C.B., Mohanty B.* // J. Hazard. Materials. – 2008. – **150**. – P. 695 – 702.
- [50] *Sun H., Wang L., Zhang R., Sui J., Xu G.* // Ibid. – 2006. – **129**. – P. 297 – 303.
- [51] *Bang S., Korfiatis G.P., Meng Xi.* // Ibid. – 2005. – **121**. – P. 61 – 67.
- [52] *Tyrovola K., Nicolaidis N.P., Veranis N., Kallithrakas-Kontos N., Koulouridakis P.E.* // Water Res. – 2006. – **40**, N 12. – P. 2375 – 2386.
- [53] *Lien H-L., Wilkin R.T.* // Chemosphere. – 2005. – **59**. – P. 377 – 386.
- [54] *Nicolaidis N.P., Dobbs G.M., Lackovic J.A.* // Water Res. – 2003. – **37**. – P. 1417 – 1425.
- [55] *Kanel S.R., Manning B., Charlet L., Choi H.* // Environ. Sci. Technol. – 2005. – **39**. – P. 1291 – 1298.
- [56] *Kanel S.R., Greneche J-M., Choi H.* // Ibid. – 2006. – **40**. – P. 2045 – 2050.
- [57] *Cheng Z., Geen A., Louis R., Nicolaidis N., Bailey R.* // Ibid. – 2005. – **39**. – P. 7662 – 7666.
- [58] *Su C., Puls. R.W.* // Ibid. – 2004. – **38**. – P. 5224 – 5231.
- [59] *Мельник Л.А.* // Химия и технология воды. – 2010. – **32**, № 5. – С. 559 – 571.
- [60] *Shih M-Ch.* // Desalination. – 2005. – **172**. – P.85 – 97.
- [61] *Saitua H., Campderros M., Cerutti S., Padilla A.P.* // Ibid. – 2005. – **172**. – P.173 – 180.
- [62] *Vrijenhoek E.M., Waypa J.J.* // Ibid. – 2000. – **130**. – P. 265 – 277.
- [63] *Oh J.-I., Lee S-H., Yamamoto K.* // J. Membr.Sci.– 2004. – **234**. – P. 167 – 175.
- [64] *Oh J.I., Yamamoto K., Kitawaki H., Nakao S., Sugawara T., Rahman M.M., Rahman M.H.* // Desalination. – 2000. – **132**. – P. 307 – 314.
- [65] *Sato Y., Kang M., Kamei T., Magara Y.* // Water Res. – 2002. – **36**. – P. 3371 – 3377.
- [66] *Bruggen B.V., Vandecasteele C.* // Environ. Pollut. – 2003. – **122**. – P. 435 – 445.