

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

**СОЦИОЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
ВЛИЯНИЯ ТОКСИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ
НА ПСИХО-ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗДОРОВЬЕ
ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ**

**А.В. Скальный^{1,2,3*}, Е.Ю. Астраханцева⁴, М.Г. Скальная¹,
А.Л. Мазалецкая³, А.А. Тиньков^{3,5}**

¹Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

²Институт Микроэлементов ЮНЕСКО, Лион, Франция

³Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия

⁴Министерство сельского хозяйства РФ, Москва, Россия

⁵Оренбургский государственный медицинский университет, Оренбург, Россия

РЕЗЮМЕ. Представлены данные о влиянии токсичных металлов на снижение интеллекта, развитие нейropsychических нарушений у детей и подростков, требующих предоставления специальных образовательных услуг, а также о стоимости таких услуг для государства. Показано, что избыток свинца связан со снижением IQ, развитием синдрома дефицита внимания с гиперактивностью (СДВГ) и аутизма, антисоциальным и агрессивным поведением, склонностью к употреблению алкоголя и наркотиков, совершению преступлений. Установлено, что снижение уровня свинца в крови детей за счет снижения уровня свинца в красках (стоимость – \$1–11 млрд) привело к сокращению расходов на специальное образование (\$30–146 млрд), СДВГ (\$267 млрд), а также к уменьшению криминальной активности (\$1,7 млрд). Избыточное воздействие ртути приводит к снижению IQ, задержке умственного развития, СДВГ и аутизма, склонности к правонарушениям. При этом предотвращение избыточного воздействия метилртути приводит к сохранению 600 000 пунктов IQ, что соответствует экономии 8–9 млрд евро в год только за счет предотвращения снижения интеллекта. Хроническое воздействие мышьяка сопровождается снижением IQ, нарушением памяти, внимания, моторных функций, развитием СДВГ, причем данные нарушения занимают до 1/5 от всего ущерба от воздействия мышьяка. Воздействии кадмия ассоциировано со снижением IQ, нарушением языковых навыков, способности к обучению, внимания, социального поведения, а также с повышением отвлекаемости и склонности к правонарушениям. Интоксикация марганцем влечет за собой снижение IQ, потенцирование негативных эффектов свинца и мышьяка на умственные способности, нарушение языковых способностей, памяти, внимания, моторных навыков, развитие СДВГ, агрессивного поведения, а также повышение восприимчивости к алкоголю и правонарушения. Мониторинг и коррекция хронического воздействия тяжелых металлов на популяционном и индивидуальном уровнях позволит существенно снизить расходы на образовательные услуги, повысить эффективность образования, интеллектуальный уровень населения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интеллект, ртуть, кадмий, свинец, экономический ущерб.

ВВЕДЕНИЕ

Образование является одним из основных элементов формирования человеческого капитала (Журавлев, Ушаков, 2009). Продемонстрировано, что при повышении уровня образования на 10% производительность труда возрастает на 8,6%, в то время как 10%-ное увеличение основных фондов приводит лишь к 3,4%-ному росту (Тугускина, 2009). Количество лет, потраченное

на образование, характеризуется прямой связью с величиной ВВП (Rindermann, 2008).

Высокий уровень интеллекта – один из основополагающих факторов качества образования (Deary et al., 2007). Помимо этого, снижение интеллекта сопровождается существенным повышением затрат на образование. Так, расходы правительства Австралии на образование лиц с интеллектуальным дефицитом составляют при-

* Адрес для переписки:

Скальный Анатолий Викторович
E-mail: skalny3@gmail.com

мерно 350 млн австралийских долларов (Doran et al., 2012). В то же время существенное воздействие на стоимость образования оказывает наличие нейропсихических нарушений, повышающих потребность в специальном образовании. Установлено, что в масштабах Голландии затраты на детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) составляют от 1 до 1,5 млрд евро в год, из которых 42–62% приходится на стоимость специального образования (Wasserman et al., 2014), а соотношение затрат по сравнению со здоровыми детьми составляет примерно 6:1 (Van Der Kolk et al., 2014). Важным аспектом является риск формирования антисоциального поведения у детей с СДВГ (Полунина и др., 2007). Установлено, что расходы на образование в группах лиц с нарушениями поведения и расстройствами поведения превышают соответствующие показатели в группе с нормальным поведением в 5 и 8 раз соответственно (Scott et al., 2001). Агрессивное поведение также является актуальной педагогической проблемой (Цыренов, 2010).

Более значимые расходы на образование связаны с органической патологией нервной системы у детей. Стоимость расходов на образование на один случай эпилепсии составляет 11,5 тыс. фунтов стерлингов (IQ < 85) (Hunter et al., 2015). Расходы на специальное образование детей с расстройствами аутистического спектра (РАС) в Великобритании и США превышают стоимость образования здоровых детей более чем в 2 раза (Buescher et al., 2014).

Интенсивное развитие промышленности в течение последних 100 лет привело к значительному загрязнению окружающей среды, которое оказывает выраженное влияние на демографические показатели (Скальная и др., 2011; Агаджанян и др., 2014), заболеваемость раком различной локализации, сердечно-сосудистые заболевания (Рахманин и др., 2006; Skalny et al., 2016). Ряд поллютантов, к которым относятся и токсичные металлы, такие как свинец, кадмий, ртуть, марганец, а также металлоид мышьяк, оказывает выраженное негативное воздействие на центральную нервную систему, что может приводить к развитию нейродегенеративных заболеваний (Wright, Vaccarelli, 2007). Влияние загрязнения окружающей среды на интеллектуальные способности, психическое здоровье (Demeneix, 2014), а также экономические последствия подобных нарушений остаются недооцененными. В то же время в ходе реализации проекта ESPREME (6-я рамочная программа ЕЭС) (EU-Project ESPREME, 2012) установлено, что структура экономического ущерба от воздействия токсичных металлов представляется сле-

дующим образом: потери IQ вследствие воздействия свинца (44,3 млрд €/год) > анемия, индуцированная свинцом (15,3 млрд €/год) > сердечно-сосудистые заболевания вследствие интоксикации мышьяком (11,1 млрд €/год) > кадмий-индуцированный остеопороз (3,7 млрд €/год) > мертворождение вследствие воздействия мышьяка (1,3 млрд €/год) > ртуть-индуцированное снижение IQ (1,3 млрд €/год), что указывает на важную роль металл-индуцированного повреждения центральной нервной системы в общей структуре ущерба.

Ц е л ь р а б о т ы – представление данных о влиянии наиболее экологически-значимых токсичных металлов на снижение интеллекта и экономических потерях от данного снижения для государства, развитие нейропсихических нарушений, требующих предоставления специальных образовательных услуг, а также стоимость данных услуг для системы образования.

СВИНЕЦ

Наибольшее количество существующих исследований в данной области посвящено изучению нейрокогнитивных эффектов воздействия свинца. Обследование 25,5 млн детей показало, что воздействие свинца сопровождается суммарным снижением уровня IQ по шкале Векслера практически на 23 млн пунктов (Bellinger, 2012). В среднем снижение уровня IQ в европейской популяции вследствие потребления в пищу продуктов, загрязненных свинцом, находится в диапазоне от 0,10 (Норвегия) до 0,49 пунктов (Германия) (Bierkens et al., 2012). При этом повышение уровня свинца в крови на 1 мкг/дл приводит к снижению IQ на величину от 0,257 (Pizzol et al., 2010) до 3,32 пунктов (Solon et al., 2008), что оказывает существенное негативное влияние на школьную успеваемость (Miranda et al., 2009). Установлено, что даже низкий уровень свинца в периферической крови детей (< 10 мкг/дл) является предиктором худшей успеваемости (Liu et al., 2013). В связи с тесной ассоциацией между воздействием свинца и интеллектуальными способностями, было предложено использовать снижение интеллекта у детей в качестве маркера интоксикации свинцом (Ильин и др., 2004).

Повышение уровня свинца в крови школьников связано с повышенным риском развития СДВГ (Ham et al., 2009) и более глубокими нарушениями социальной адаптации у детей с РАС (Priya, Geetha, 2011). При этом уровень свинца в организме оказывает негативное влияние на детей с нарушениями поведения (Szkur-Jablonska et al., 2012). Установлена взаимосвязь

между ранним воздействием свинца и антисоциальным поведением, употреблением марихуаны подростками (Dietrich et al., 2001), склонностью к употреблению алкоголя и тяжелых наркотиков (Masters, Coplan, 1999), увеличением частоты арестов, в том числе арестов за преступления, связанные с насилием (Wright et al., 2008), а также четырехкратным увеличением количества убийств в США (при сравнении штатов с максимальной и минимальной концентрацией свинца) (Stretesky, Lynch, 2001). В связи с этим в одном из изданий свинец обозначен как «криминальный элемент Америки» (Drum, 2013).

В середине 1990-х годов предполагалось, что снижение выбросов свинца в атмосферу в Нью-Йорке способно сохранять до 17 млрд долларов вследствие снижения прямых и непрямых затрат в течение последующих 20 лет за счет снижения воздействия свинца на интеллект детей (Needleman, 1994). Позднее было установлено, что снижение уровня свинца в крови детей за счет снижения уровня свинца в красках (стоимость \$1–11 млрд) приводило к сокращению затрат на здравоохранение (\$11–53 млрд), увеличению продолжительности жизни (\$165–233 млрд), сбору налогов (\$25–35 млрд), уменьшению расходов на специальное образование (\$30–146 млрд), СДВГ (\$267 млрд), а также к уменьшению криминальной активности (\$1,7 млрд). Таким образом, соотношение расходов и экономии составило 1 к 17–221 (Gould, 2009). При этом эффект запрета на использование свинца в топливе за счет предотвращения снижения IQ равнялся 637,4–865,4 млн евро только на территории Мадрида за 10 лет наблюдения (Gertler et al., 2016). Следовательно, контроль за выбросами свинца позволяет избежать избыточных затрат посредством снижения расходов на здравоохранение (регулярный скрининг, лечение случаев интоксикации), а также социальных затрат, связанных с нетрудоспособностью, снижением работоспособности, антисоциальным поведением и необходимостью специального образования (Pichery et al., 2011).

РТУТЬ

Повышение уровня ртути в волосах сопровождается дозозависимым снижением уровня IQ, нарушением умственных способностей, а также ассоциированным ежегодным ущербом для экономики в размере 77,4 млн долларов США (Trasande et al., 2016). Общепринятой является оценка, при которой повышение уровня ртути в волосах женщин на каждый 1 мкг/г сопровождается снижением IQ у их детей на 0,18 пунктов (Axelrad et al., 2007). В то же время при анализе воздействия метилртути установлено, что увели-

чение содержания ртути в волосах на 1 мкг/г может приводить к снижению IQ на величину до 1,5 пунктов (Cohen et al., 2005). Также выявлена связь между увеличением уровня ртути в пуповинной крови выше 5,8 мкг/л и последующим снижением IQ у ребенка (Trasande et al., 2005). Учитывая современные тенденции, можно отметить, что ожидаемое увеличение выброса ртути в окружающую среду на 25% (2005–2020 гг.) способно привести к увеличению расходов, связанных со снижением интеллектуальных способностей населения, до 3,7 млрд долларов США (по курсу 2005 г.) (Sundseth et al., 2010). Соответственно, повышенный уровень ртути у детей дошкольного возраста ассоциирован с задержкой умственного развития (Freire et al., 2010), что негативно сказывается на способности детей к обучению (Dufault et al., 2009).

Наряду со снижением интеллекта у детей, воздействие ртути также связано с целым рядом нейropsychических нарушений, требующих особого подхода в коррекции и образовании. Ртуть является одним из ведущих факторов окружающей среды, связанным с развитием РАС (Kern et al., 2016), а также тяжестью психосоциальных нарушений при данной патологии (Khaled et al., 2016), что согласуется с повышенным уровнем ртути в крови и волосах детей с РАС (Priya, Geetha, 2011; Hodgson et al., 2014). Соответственно, повышение уровня ртути в окружающей среде связано с увеличением частоты использования специального образования в основном за счет детей с аутизмом (Palmer et al., 2006). Помимо этого, продемонстрирована тесная взаимосвязь между воздействием ртути на материнский организм по время беременности и развитием СДВГ у детей (Sagiv, 2012), а также более высоким уровнем ртути в крови детей с СДВГ (Cheuk, Wong, 2006).

Увеличение выброса ртути и ряда других металлов в окружающую среду сопровождается существенным ростом частоты судебных процессов с участием молодежи (Haynes et al., 2011). Выявлена взаимосвязь между самоубийствами и повышенным уровнем ртути в организме (Guzzi et al., 2006).

Основным экономическим следствием нейротоксического действия метилртути является утрата трудоспособности, которая в масштабах США варьирует от 2,2 до 43,8 млрд долларов США (Ghosh, Chakraborty, 2017). Установлено, что предотвращение избыточного воздействия метилртути приводит к сохранению 600 000 пунктов IQ, что соответствует экономии 8–9 млрд евро в год только за счет предотвращения снижения интеллекта (Bellinger, 2012). Аналогично замед-

ление роста количества выбросов ртути в окружающую среду с 2005 по 2020 гг. должно, согласно исходным предположениям, снизить экономический ущерб от нарушения интеллекта, на 1,8–2,2 млрд долларов (Sundseth et al., 2010).

МЫШЬЯК

Воздействие мышьяка оказывает существенное влияние на IQ и память у детей младшего школьного возраста. В частности, употребление питьевой воды, содержащей более 5 мкг/л мышьяка, сопровождается снижением IQ на 5–6 пунктов, а также других показателей (память, навыки общения) (Wasserman et al., 2014). Регрессионный анализ также показал достоверную отрицательную взаимосвязь между уровнем мышьяка в питьевой воде, величиной IQ и памятью (Ghosh, Chakraborty, 2017). Соответственно, повышение концентрации мышьяка в моче свидетельствует о существенном негативном влиянии его на умственные способности детей 6–8 лет (Rosado et al., 2007). Увеличение концентрации мышьяка в моче на каждые 100 мкг/л сопровождается снижением IQ на 1–3 пункта у девочек (Hamadani et al., 2011). При этом негативное влияние токсического воздействия мышьяка на умственные способности было более выраженным у детей младшего возраста (Wasserman et al., 2007). Результаты другого исследования выявили более высокие концентрации мышьяка в моче у детей в возрасте 9–10 лет по сравнению с младшей группой (4–5 лет), что сопровождалось более выраженным снижением IQ, косвенно свидетельствующем о развитии кумулятивного эффекта (Nahar et al., 2014). Обратная связь с уровнем IQ выявлена при исследовании уровня мышьяка в волосах детей в возрасте 11–13 лет (Wright et al., 2006; Wang et al., 2007).

Воздействие мышьяка также достоверно взаимосвязано с нарушением внимания у школьников (Rodríguez-Barranco et al., 2016) и нарушением моторных функций у детей 8–11 лет (Parvez et al., 2011). Более того, содержание мышьяка в моче ассоциировано с нарушением умственных способностей и СДВГ (Roy et al., 2011). Проведенные исследования также выявили взаимосвязь между повышенным уровнем мышьяка в волосах и нарушением развития речи (Skalny et al., 2016). Данные наблюдения согласуются с данными о достоверной корреляции между уровнем мышьяка в волосах детей и электрической активностью мозга (Барабан, 2010).

Также было установлено, что содержание мышьяка у лиц, осужденных на лишение свободы, достоверно превышает контрольные значения (Нотов, Сапух, 2006), что также может сви-

детельствовать о роли мышьяка в повышении склонности к правонарушениям.

Установлено, что суммарный ущерб для здоровья от выброса в атмосферу 1 кг мышьяка составляет 3742 долларов США (2010), причем почти 1/5 от всего ущерба приходится именно на прямые и не прямые последствия снижения IQ и другие психические нарушения (Nedellec, Rabl, 2016). Согласно данным ЮНИСЕФ, в Республике Бангладеш затраты на снабжение чистой питьевой водой оцениваются в \$50–85 млн, в то время как ущерб ввиду преждевременной смертности и развития заболеваний, связанных с воздействием мышьяка (в том числе и за счет снижения IQ), составляет 500–1670 млн долларов США. Таким образом, соотношение экономии (доходов) и расходов на нормализацию уровня мышьяка составляет минимум 10 к 1 (Flanagan, Zheng, 2011).

КАДМИЙ

Воздействие кадмия во время беременности также приводит к снижению уровня IQ у детей в возрасте 5 лет (Jeong et al., 2015). В соответствии с этим концентрация кадмия в пуповинной крови характеризуется обратной взаимосвязью с уровнем IQ у детей дошкольного возраста (Tian et al., 2009). При этом 10-кратное увеличение уровня кадмия в крови матери сопровождается снижением коэффициента развития ребенка, оцениваемого в 12 месяцев, на 5,7 пунктов за счет социального аспекта (Wang et al., 2016). В то же время двукратное увеличение уровня кадмия в моче женщин на ранних сроках беременности ассоциировано со снижением интеллекта на 0,8 пунктов IQ (Kippler et al., 2012). Аналогичные зависимости выявлены при исследовании уровня кадмия в крови детей 4–7 лет (Zhu et al., 2007). Отмечалось негативное повышение концентрации кадмия в крови на языковые навыки (Li et al., 2003), умственное развитие (Marlowe et al., 1983), а также перцепционное мышление и понимание речи (Rodríguez-Barranco et al., 2014). При этом двукратное увеличение концентрации кадмия в моче сопровождается снижением уровня IQ на 2 пункта у мальчиков (Rodríguez-Barranco et al., 2014). Более того, увеличение уровня кадмия в моче сопровождается повышением риска необучаемости и потребности в специальном образовании (Ciesielski et al., 2012). Повышенный уровень кадмия в волосах также выявлен у детей с аутизмом (Blaurock-Busch et al., 2012) и расстройствами речи (Skalny et al., 2016).

Кадмий также оказывает существенное влияние на поведение. Так, концентрация кадмия в моче при воздействии металла в раннем возрасте взаимосвязана со нарушениями поведения (Но-

тов, Сапух, 2006). Повышенный уровень кадмия в волосах на фоне снижения кальция характерен для детей с высокой отвлекаемостью (Le Clair, Quig, 2001), нарушением внимания и социальным поведением (Bao et al., 2009), что в целом согласуется с повышенным уровнем кадмия в волосах лиц, совершивших насильственные преступления (Masters et al., 1998).

Учитывая высокую социоэкономическую стоимость снижения IQ, справедливо предположить, что кадмий-ассоциированные нарушения интеллекта составляют существенную долю в расходах, связанных с избыточным воздействием кадмия.

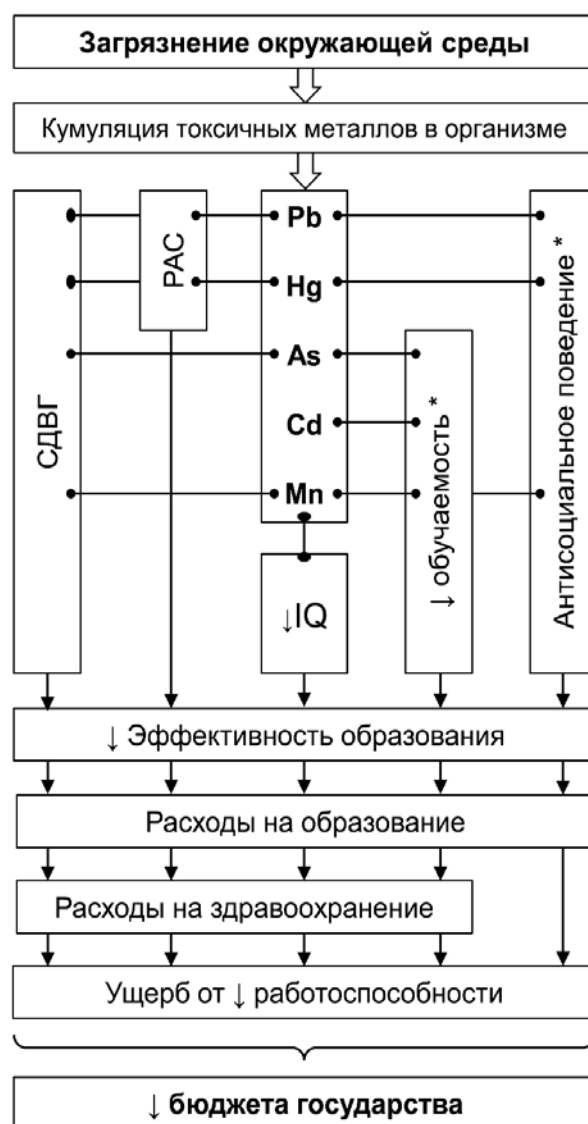
МАРГАНЕЦ

Несмотря на тот факт, что марганец является эссенциальным элементом, входящим в структуру ряда ферментов (Скальная, Скальный, 2015), при избыточном воздействии данный металл проявляет нейротоксические свойства (Wright, Vaccarelli, 2007). Так, избыточное поступление марганца с питьевой водой сопровождается снижением IQ у детей (Wasserman et al., 2007), составляющим 2,4 пункта при 10-кратном увеличении (Bouchard et al., 2011). Помимо этого, отмечается сочетанный эффект марганца и мышьяка (Wright et al., 2006), а также марганца и свинца на уровень IQ у детей (Kim et al., 2009). Повышенные значения уровня марганца в волосах также взаимосвязаны с худшими умственными показателями, речевыми навыками (Menezes-Filho et al., 2011), языковым обучением и памятью у детей (Torres-Agustín et al., 2011). При этом у детей с худшей успеваемостью в школе выявлена повышенная концентрация марганца в крови (Zhang et al., 1995). Аналогично нами было обнаружено некоторое повышение содержания марганца у студенток колледжей с худшей успеваемостью, однако у юношей наблюдалась обратная ситуация. Наряду с этим избыточное воздействие взаимосвязано с моторными нарушениями у детей (Zoni, Lucchini, 2013). Также выявлено повышения уровня марганца в сыворотке крови детей с детским аутизмом, но не атипичным аутизмом (Skalny et al., 2016).

Продемонстрирована ассоциация концентрации марганца в сыворотке с СДВГ (Farias et al., 2010), агрессивным поведением и проблемами с вниманием (Menezes-Filho et al., 2014). Аналогичная взаимосвязь выявлена для уровня марганца в питьевой воде и поведением в школе (Khan et al., 2011), а также гиперактивным поведением (Bouchard et al., 2007). Взаимосвязь избыточного воздействия марганца с отклонениями

поведения также подтверждается повышенным уровнем марганца в волосах лиц с агрессивным поведением, в том числе совершивших насильственные преступления (Gottschalk et al., 1991). Это также подтверждается данными о повышении уровня марганца в волосах заключенных (Нотов, Сапух, 2006).

Таким образом, указанные выше исследования продемонстрировали существенное влияние интоксикации тяжелыми металлами на интеллектуальные способности детей, нарушение поведения, развитие нейropsychических расстройств, а также расстройств поведения, требующих специального педагогического подхода (рисунок).



Влияние воздействия токсичных металлов на нейropsychическое здоровье детей и его возможные социоэкономические последствия в масштабах государства (в блоках представлены обобщенные эффекты)*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг выбросов токсичных металлов в атмосферу, а также ограничение их воздействия на организм беременных женщин и детей способны существенно снизить риск нейротоксического воздействия микроэлементов, предотвращая формирование интеллектуальных и нейропсихических расстройства и их последствий на национальном уровне. С одной стороны, данные мероприятия способны существенно сократить прямые и непрямые расходы, связанные с образованием и здравоохранением, с другой – повышение IQ населения позволит увеличить ВВП страны. В то же время персонализированная диагностика и коррекция хронической интоксикации тяжелыми металлами может также оказывать положительный эффект на успеваемость и эффективность образования на индивидуальном уровне.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Агаджанян Н.А., Скальный А.В., Детков В.Ю. Элементный портрет человека: заболеваемость, демография и проблема управления здоровьем нации. Экология человека. 2013. № 11. С. 3–12.

(Agadzhanyan N.A., Skalny A.V., Detkov V.Yu. [Human elemental portrait: morbidity, demography and problem of nation health management]. Human Ecology. 2013, 11:3–12 [in Russ]).

Барабан Ю.А. Корреляционные связи между содержанием мышьяка в организме и характеристиками ЭЭГ у детей и подростков 11-16 лет. Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2010. № 2(62). С. 29–35.

(Baraban Yu.A. [Correlation between arsenic concentration and EEG-waves in 11-16 year old children]. Scientific Notes of Taurida V.I. Vernadsky National University. – Series: Biology, Chemistry. 2010; 2(62):29–35 [in Russ]).

Журавлев А.Л., Ушаков Д.В. Образование и конкурентоспособность нации: психологические аспекты. Психологический журнал. 2009. Т.30. № 1. С. 5–13.

(Zhuravlev A.L., Ushakov D.V. [Education and competitiveness of nation: psychological aspects]. Psikhologicheskii zhurnal. 2009; 30(1): 5–13 [in Russ]).

Ильин В. П., Ляшенко О. В., Савченков М. Ф. Вероятностная оценка динамики формирования интеллектуального статуса детского населения в условиях свинцового загрязнения окружающей среды. Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 2004; Т. 2, № 1. С. 133–136.

(Il'in V.P., Ljashenko O.V., Savchenkov M.F. [Probabilistic assessment of the dynamics of the formation of the intellectual status of children in conditions of lead pollution of the environment]. Acta Biomedica Scientifica. 2004; 2 (1): 133-136 [in Russ]).

Нотов О.С., Сапух Е.В. К вопросу об изучении взаимосвязи элементного статуса и уровня интеллектуального развития. Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 12-2. С. 186–189.

(Notov O.S., Sapukh E.V. [To the question of studying the relationship between elemental status and the level of intellectual development]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2006; 12(2) [in Russ]).

Полунина А.Г. Давыдов Д.М., Брюн Е.А. Синдром дефицита внимания с гиперактивностью и антисоциальное поведение у детей: неврологические аспекты. Русский журнал детской неврологии. 2007. Т. 2, № 1. С. 22–30.

(Polunina A.G. Davydov D.M., Bryun E.A. [Attention deficit hyperactivity disorder and antisocial behavior in children: neurological aspects]. Russian Journal of Child Neurology. 2007; 2(1): 22–30 [in Russ]).

Рахманин Ю.А., Новиков С.М., Румянцев Г.И., Иванов С.И. Оценка ущерба здоровью человека как одно из приоритетных направлений экологии человека и инструмент обоснования управленческих решений; Гигиена и санитария. 2006. № 5. С. 10–13.

(Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Rummyantsev G.I., Ivanov S.I. [Assessment of human health damage as a priority of human ecology and a tool for justifying managerial decisions]. Hygiene and Sanitation. 2006; 5, 10-13 [in Russ]).

Скальная М.Г., Лакарова Е.В., Скальный А.В., Демидов В.А. Элементный состав волос и заболеваемость взрослого населения. Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 15. С. 45–48.

(Skalnaya M.G., Lakarova E.V., Skalny A.V., Demidov V.A. [Elemental composition of hair and morbidity in adults]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011; 15: 45–48 [in Russ]).

Скальная М.Г., Скальный А.В. Микроэлементы: биологическая роль и значение для медицинской практики. Сообщение 3. Марганец; Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2015. № 3. С. 14–25.

(Skalnaya M.G., Skalny A.V. [Trace elements: the biological role and significance for medical practice. Communication 3. Manganese]. Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry. 2015; 3:14–25 [in Russ]).

Тугускина Г.Н. Оценка эффективности инвестиций в человеческий капитал предприятий. Управление персоналом. 2009. № 3. С. 73–77.

(Tuguskina G.N. [Evaluation of the effectiveness of investments in the human capital of enterprises]. Upravlenie personalom. 2009; 3: 73–77 [in Russ]).

Цыренов В.Ц. Агрессивное поведение молодежи как социально-педагогическая проблема. Вестник Бурятского государственного университета. 2010. № 1. С. 49–53.

(Tsyrenov V.Ts. [Youth aggressive behavior of the social-pedagogical problem]. The Buryat State University Bulletin. 2010; 1: 49–53 [in Russ]).

Axelrad D.A., Bellinger D.C., Ryan L.M., Woodruff T.J. Dose-response relationship of prenatal mercury exposure and IQ: an integrative analysis of epidemiologic data. Environ Health Persp. 2007; 115(4): 609–615.

Bao Q.S., Lu C.Y., Song H., Wang M., Ling W., Chen W.Q., et al. Behavioural development of school-aged children who live around a multi-metal sulphide mine in Guangdong province, China: a cross-sectional study. BMC Public Health. 2009; 9(1): 217.

- Bellinger D.C. A strategy for comparing the contributions of environmental chemicals and other risk factors to neurodevelopment of children. *Environ Health Persp.* 2012; 120(4): 501.
- Bierkens J., Buekers J., Van Holderbeke M., Torfs R. Health impact assessment and monetary valuation of IQ loss in pre-school children due to lead exposure through locally produced food. *Sci Total Environ.* 2012; 414:90–97.
- Blaurock-Busch E., Amin O.R., Dessoki H.H., Rabah T. Toxic metals and essential elements in hair and severity of symptoms among children with autism. *Maedica (Buchar.)*. 2012; 7(1):38-48.
- Bouchard M.F., Sauvé S., Barbeau B., Legrand M., Brodeur M.È., Bouffard T., et al. Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. *Environ Health Persp.* 2011; 119 (1): 138.
- Bouchard M., Laforest F., Vandelac L., Bellinger D., Mergler D. Hair manganese and hyperactive behaviors: pilot study of school-age children exposed through tap water. *Environ Health Persp.* 2007:122–127.
- Buescher A.V., Cidav Z., Knapp M., Mandell D.S. Costs of autism spectrum disorders in the United Kingdom and the United States. *JAMA Pediatr.* 2014; 168(8):721–728.
- Cheuk D., Wong V. Attention-deficit hyperactivity disorder and blood mercury level: a case-control study in Chinese children. *Neuropediatrics.* 2006; 37(4):234–240.
- Ciesielski T., Weuve J., Bellinger D.C., Schwartz J., Lanphear B., Wright R.O. Cadmium exposure and neurodevelopmental outcomes in US children. *Environ Health Persp.* 2012; 120(5):758.
- Cohen J.T. Bellinger D.C., Shaywitz B.A. A quantitative analysis of prenatal methyl mercury exposure and cognitive development. *Am J Prev Med.* 2005; 29(4):53–53. e324.
- Deary I.J., Strand S., Smith P., Fernandes C. Intelligence and educational achievement. *Intelligence.* 2007; 35(1):13–21.
- Demeneix B. *Losing our minds: how environmental pollution impairs human intelligence and mental health.* New York: Oxford University Press. 2014.
- Dietrich K.N., Douglas R.M., Succop P.A., Berger O.G., Bornschein R.L. Early exposure to lead and juvenile delinquency. *Neurotoxicol Teratol.* 2001; 23 (6): 511–518.
- Doran C.M., Einfeld S.L., Madden R.H., Otim M., Horstead S.K., Ellis L.A., et al. How much does intellectual disability really cost? First estimates for Australia. *J Intellect Dev Disabil.* 2012; 37(1):42–49.
- Drum K. America's real criminal element: Lead. *Mother Jones.* 2013; 38 (1):28–62.
- Dufault R., Schnoll R., Lukiw W. J., LeBlanc B., Cornett C., Patrick L., et al. Mercury exposure, nutritional deficiencies and metabolic disruptions may affect learning in children. *Behav Brain Funct.* 2009; 5(1):44.
- EU-Project ESPREME' 2012, <http://espreme.ier.uni-stuttgart.de/>
- Farias A.C., Cunha A., Benko C.R., McCracken J.T., Costa M.T., Farias L.G., et al. Manganese in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: relationship with methylphenidate exposure. *J Child Adol Psychop.* 2010; 20(2):113–118.
- Flanagan S., Zheng Y. Making Economics Sense for Arsenic Mitigation): A Case Study of Comilla District. Dhaka: UNICEF Bangladesh. 2011:55.
- Freire C., Ramos R., Lopez-Espinosa M.J., Díez S., Vioque J., Ballester F., et al. Hair mercury levels, fish consumption, and cognitive development in preschool children from Granada, Spain. *Environ Res.* 2010; 110(1):96–104.
- Gertler P.J., Martinez S., Premand P. Rawlings L.B., Vermeersch C.M. Impact evaluation in practice. World Bank Publications. 2016.
- Ghosh S.B. Chakraborty N.K. Effect of arsenic and manganese exposure on intellectual function of children in arsenic stress area of Purbasthali, Burdwan, West Bengal. *Exposure and Health.* 2017; 9(1):1–11.
- Gottschalk L.A., Rebello T., Buchsbaum M.S., Tucker H.G., Hodges E.L. Abnormalities in hair trace elements as indicators of aberrant behavior. *Compr Psychiat.* 1991; 32(3): 229–237.
- Gould E. Childhood lead poisoning: conservative estimates of the social and economic benefits of lead hazard control. *Environ Health Persp.* 2009; 117(7):1162.
- Guzzi G., Grandi M., Cattaneo C., Calza S., Minoia C., Ronchi A., Gatti A., Severi G. Dental amalgam and mercury levels in autopsy tissues: food for thought. *Am J Foren Med Path.* 2006; 27(1):42–45.
- Ha M., Kwon H.J., Lim M.H. Low blood levels of lead and mercury and symptoms of attention deficit hyperactivity in children: a report of the children's health and environment research (CHEER). *Neurotoxicology.* 2009; 30(1):31–36.
- Hamadani J., Tofail F., Nermell B. Critical windows of exposure for arsenic-associated impairment of cognitive function in pre-school girls and boys: a population-based cohort study. *Int J Epidemiol.* 2011; 40(6):1593–1604.
- Haynes E.N., Chen A., Ryan P., Succop P., Wright J., Dietrich K.N. Exposure to airborne metals and particulate matter and risk for youth adjudicated for criminal activity. *Environ Res.* 2011; 111(8):1243–1248.
- Hodgson N.W., Waly M. I., Al-Farsi Y. M., Al-Sharbaty M.M., Al-Farsi O., Ali A., et al. Decreased glutathione and elevated hair mercury levels are associated with nutritional deficiency-based autism in Oman. *Exp Biol Med.* 2014; 239(6):697–706.
- Hunter R.M., Reilly C., Atkinson P., Das K.B., Gillberg C., Chin R.F., Scott R.C., et al. The health, education, and social

- care costs of school-aged children with active epilepsy: A population-based study. *Epilepsia*. 2015; 56(7):1056–1064.
- Jeong K.S., Park H., Ha E., Hong Y.C., Ha M., Park H., et al. Performance IQ in children is associated with blood cadmium concentration in early pregnancy. *J Trace Elem Med Biol*. 2015; 30:107–111.
- Kern J.K., Geier D.A., Sykes L.K., Haley B.E., Geier M.R. The relationship between mercury and autism: A comprehensive review and discussion. *J Trace Elem Med Biol*. 2016; 37:8–24.
- Khaled E.M., Meguid N.A., Bjørklund G., Gouda A., Bahary M.H., Hashish A., et al. Altered urinary porphyrins and mercury exposure as biomarkers for autism severity in Egyptian children with autism spectrum disorder. *Metab Brain Dis*. 2016; 31(6):1419–1426.
- Khan K., Factor-Litvak P., Wasserman G.A., Liu X., Ahmed E., Parvez F., et al. Manganese exposure from drinking water and children's classroom behavior in Bangladesh. *Environ Health Persp*. 2011; 119(10):1501.
- Kim Y., Kim B.N., Hong Y. C., Shin M.S., Yoo H.J., Kim J.W., et al. Co-exposure to environmental lead and manganese affects the intelligence of school-aged children. *Neurotoxicology*. 2009; 30(4):564–571.
- Kippler M., Tofail F., Hamadani J.D., Gardner R.M., Grantham-McGregor S.M., Bottai M., et al. Early-life cadmium exposure and child development in 5-year-old girls and boys: a cohort study in rural Bangladesh. *Environ Health Persp*. 2012; 120(10):1462.
- LeClair J.A., Quig D.W. Mineral status, toxic metal exposure and children's behavior. *J Orthomol Med*. 2001; 16(1):13–32.
- Li J., Gao X., Cao J. Low Intelligence and Levels of Lead and Cadmium in Children. *Chin Ment Health J*. 2003; 17(2):133–134.
- Liu J., Li L., Wang Y., Yan C., Liu X. Impact of low blood lead concentrations on IQ and school performance in Chinese children. *PLoS One*. 2013; 8(5):e65230.
- Marlowe M., Errera J., Jacobs J. Increased lead and cadmium burdens among mentally retarded children and children with borderline intelligence. *Am J Ment Defic*. 1983; 87(5):477–483.
- Masters R.D., Coplan M.J. A dynamic, multifactorial model of alcohol, drug abuse, and crime: linking neuroscience and behavior to toxicology. *Soc Sci Inform*. 1999; 38(4):591–624.
- Masters, R.D., Hone B., Doshi A. Environmental pollution, neurotoxicity, and criminal violence. *Environ Toxicol*. 1998:13–48.
- Menezes-Filho J. A., de Carvalho-Vivas C.F., Viana G.F., Ferreira J.R., Nunes L.S., Mergler D., Abreu N. Elevated manganese exposure and school-aged children's behavior: A gender-stratified analysis. *Neurotoxicology*. 2014; 45:293–300.
- Menezes-Filho J.A., Novaes C.D. O., Moreira J.C., Sarcinelli P.N., Mergler D. Elevated manganese and cognitive performance in school-aged children and their mothers. *Environ Res*. 2011; 111(1):156–163.
- Miranda M.L., Kim D., Reiter J., Galeano M.A.O., Maxson P. Environmental contributors to the achievement gap. *Neurotoxicology*. 2009; 30(6):1019–1024.
- Nahar M.N., Inaoka T., Fujimura M.A consecutive study on arsenic exposure and intelligence quotient (IQ) of children in Bangladesh. *Environ Health Prev Med*. 2014; 19 (3):194–199.
- Nedellec V., Rabl A. Costs of Health Damage from Atmospheric Emissions of Toxic Metals. Part 2: Analysis for Arsenic and Cadmium. *Risk Analysis*. 2016; 36(11):2081–2095.
- Needleman J. Money and the meaning of life. New York: Doubleday. 1994.
- Palmer R.F., Blanchard S., Stein Z., Mandell D., Miller C. Environmental mercury release, special education rates, and autism disorder: an ecological study of Texas. *Health & Place*. 2006; 12(2):203–209.
- Parvez F., Wasserman G.A., Factor-Litvak P., Liu X., Slavkovich V., Siddique A.B., et al. Arsenic exposure and motor function among children in Bangladesh. *Environ Health Persp*. 2011; 119(11):1665.
- Pichery C., Bellanger M., Zmirou-Navier D., Gloennec P., Hartemann P., Grandjean P. Childhood lead exposure in France: benefit estimation and partial cost-benefit analysis of lead hazard control. *Environ Health*. 2011; 10(1):44.
- Pizzol M., Thomsen M., Frohn L.M., Andersen M.S. External costs of atmospheric Pb emissions: valuation of neurotoxic impacts due to inhalation. *Environ Health*. 2010; 9(1):9.
- Priya M.D.L., Geetha A. Level of trace elements (copper, zinc, magnesium and selenium) and toxic elements (lead and mercury) in the hair and nail of children with autism. *Biological Trace Element Research*. 2011; 142(2):148–158.
- Rindermann H. Relevance of education and intelligence at the national level for the economic welfare of people. *Intelligence*. 2008; 36(2):127–142.
- Rodríguez-Barranco M., Gil F., Hernández A. F., Alguacil J., Lorca A., Mendoza R., et al. Postnatal arsenic exposure and attention impairment in school children. *Cortex*. 2016; 74: 370–382.
- Rodríguez-Barranco M., Lacasaña M., Gil F., Lorca A., Alguacil J., Rohlman D. S., et al. Cadmium exposure and neuropsychological development in school children in southwestern Spain. *Environ Res*. 2014; 134:66–73.
- Rosado J.L., Ronquillo D., Kordas K., Rojas O., Alatorre J., Lopez P., et al. Arsenic exposure and cognitive performance

in Mexican schoolchildren. *Environ Health Persp.* 2007;1371–1375.

Roy A., Kordas K., Lopez P., Rosado J. L., Cebrian M.E., Vargas G.G., et al. Association between arsenic exposure and behavior among first-graders from Torreon, Mexico. *Environ Res.* 2011; 111(5):670–676.

Sagiv S.K., Prenatal exposure to mercury and fish consumption during pregnancy and attention-deficit/hyperactivity disorder-related behavior in children. *Arch Pediat Adol Med.* 2012; 166(12):1123–1131.

Scott S., Knapp M., Henderson J., Maughan B. Financial cost of social exclusion: follow up study of antisocial children into adulthood. *Brit Med J.* 2001; 323(7306):191.

Skalny A.V., Simashkova N.V., Klyushnik T.P., Grabeklis A.R., Radysh I.V., Skalnaya M.G., et al. Assessment of serum trace elements and electrolytes in children with childhood and atypical autism. *J Trace Elem Med Biol.* 2017; 43:9-14.

Skalny A.V., Simashkova N.V., Klyushnik T.P., Grabeklis A.R., Radysh I.V., Skalnaya M.G., et al. Analysis of Hair Trace Elements in Children with Autism Spectrum Disorders and Communication Disorders. *Biol Trace Elem Res.* 2017; 177(2):215-223.

Skalny A.V., Skalnaya M.G., Nikonorov A.A., Tinkov A.A. Selenium Antagonism with Mercury and Arsenic; From Chemistry to Population Health and Demography. Selenium Springer International Publishing. 2016: 401–412.

Solon O., Riddell T.J., Quimbo S.A. Butrick E., Aylward G.P., Bacate M.L., et al. Associations between cognitive function, blood lead concentration, and nutrition among children in the central Philippines. *J Pediatr.* 2008; 152(2):237–243.

Stretesyk P.B., Lynch M.J. The relationship between lead exposure and homicide. *Arch Pediat Adol Med.* 2001; 155(5):579–582.

Sundseth K., Pacyna J.M., Pacyna E.G. Munthe J., Belhaj M., Astrom S. Economic benefits from decreased mercury emissions): Projections for 2020. *J Clean Prod.* 2010; 18(4):386–394.

Szkup-Jablonska M., Karakiewicz B., Grochans E., Jurczak A., Nowak-Staz G., Rotter I., et al. Effects of blood lead and cadmium levels on the functioning of children with behaviour disorders in the family environment. *Ann Agric Environ Med.* 2012; 19(2):241-246.

Tian L.L., Zhao Y.C., Wang X.C., Gu J.L., Sun Z., Zhang Y.L., et al. Effects of gestational cadmium exposure on pregnancy outcome and development in the offspring at age 4.5 years. *Biol Trace Elem Res.* 2009; 132(1–3):51–59.

Torres-Agustín R., Rodríguez-Agudelo Y., Schilman A., Solís-Vivanco R., Montes S., Riojas-Rodríguez H., et al. Effect of environmental manganese exposure on verbal learning and memory in Mexican children. *Environ Res.* 2013; 121:39–44.

Trasande L. Landrigan P.J., Schechter C. Public health and economic consequences of methyl mercury toxicity to the developing brain. *Environ Health Persp.* 2005; 113(5): 590–596.

Trasande L., DiGangi J., Evers D.C. Petrlik J., Buck D. G., Šamánek J. et al. Economic implications of mercury exposure in the context of the global mercury treaty): Hair mercury levels and estimated lost economic productivity in selected developing countries. *J Environ Manage.* 2016; 183:229–235.

Van Der Kolk A., Van Agthoven M., Bouwmans C., Buitelaar J.K., Hakkaart L. Societal Costs and QoL of Children with ADHD and their Parents: a Comparison to a Reference Group from the General Population. *Value Health.* 2014; 17(7):A462.

Wang S.-X., Wang Z. H., Cheng X.T., Li J., Sang Z.P., Zhang X.D., et al. Arsenic and fluoride exposure in drinking water):children's IQ and growth in Shanyin county, Shanxi province, China. *Environ Health Persp.* 2007; 115(4):643–647.

Wang Y., Chen L., Gao Y., Zhang Y., Wang C., Zhou Y., et al. Effects of prenatal exposure to cadmium on neurodevelopment of infants in Shandong, China. *Environ Pollut.* 2016; 211:67–73.

Wasserman G.A., Liu X., Parvez F., Ahsan H., Factor-Litvak P., Kline J., et al. Water arsenic exposure and intellectual function in 6-year-old children in Araihaazar, Bangladesh. *Environ Health Persp.* 2007;115(2): 285–289.

Wasserman G.A., Liu, X., LoIacono N.J., Kline J., Factor-Litvak P., van Geen A., J.L., et al. A cross-sectional study of well water arsenic and child IQ in Maine schoolchildren. *Environ Health.* 2014; 13(1):23.

Wright J.P., Dietrich K.N., Ris M.D.,Hornung R.W., Wessel S.D., Lanphear B.P., et al. Association of prenatal and childhood blood lead concentrations with criminal arrests in early adulthood. *PLoS Medicine.* 2008; 5(5):e101.

Wright R.O., Amarasiriwardena C., Woolf A.D., Jim R., Bellinger D.C. Neuropsychological correlates of hair arsenic, manganese, and cadmium levels in school-age children residing near a hazardous waste site. *Neurotoxicology.* 2006; 27(2): 210–216.

Wright R.O., Baccarelli A. Metals and neurotoxicology. *The Journal of Nutrition.* 2007; 137(12):2809–2813.

Zhang G., Liu D., He P. Effects of manganese on learning abilities in school children; *Zhonghuayu fang yixuezazhi* [Chinese journal of preventive medicine]; 1995; 29(3):156–158.

Zhu Q. X., Zhu Z. P., Yang Y.J., Bian L.N., Wang Y.C., Liu J.H. Analysis on the relationship of serum metallic elements on children's intelligence quotients. *Chin J School Health.* 2007; 28:316–318.

Zoni S., Lucchini R.G. Manganese exposure: cognitive, motor and behavioral effects on children): a review of recent findings. *Curr Opin Pediatr.* 2013; 25 (2):255.

SOCIOECONOMIC EFFECTS OF TOXIC METAL EXPOSURE ON PSYCHO-INTELLECTUAL HEALTH OF CHILDREN AND ADOLESCENTS

*A.V. Skalny^{1,2,3}, E.Yu. Astrakhantseva⁴, M.G. Skalnaya¹,
A.L. Mazaletskaya³, A.A. Tinkov^{3,5}*

¹ People's Friendship University of Russian, Miklukho-Maklaya str. 6, Moscow, 117198, Russia

² Trace element institute for UNESCO, Lyon, France

³ P.G. Demidov Yaroslavl State University, Sovetskaya str. 14, Yaroslavl, 150000, Russia

⁴ Ministry of agriculture of the Russian Federation, Orlikov Lane, 1/11, Moscow, 107139, Russia

⁵ Orenburg State Medical University, Orenburg, Russia Orenburg State Medical University, Sovetskaya str. 6, Orenburg, 460000, Russia

ABSTRACT. The objective of the present work was to review data on the impact of heavy metal exposure on intellectual disability and neuropsychic disturbances that require special education, as well as the economic costs of these services for the government. In particular, lead exposure is associated with intelligence quotient (IQ) loss, increased risk of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD), autism spectrum disorders, antisocial and aggressive behavior, predisposition to alcoholism, narcomania, and criminal activities. It has been estimated that a decrease of blood lead levels in children due to limitation of lead content in paintings (total costs – \$1–11 billion), resulted in decreased expenses related to special education (\$30–146 billion), ADHD (\$267 billion), as well as reduced criminal activity (\$1,7 billion). Excessive mercury exposure is also associated with IQ loss, decreased mental development, higher risk of ADHD, autism spectrum disorders, as well as elevated predisposition to violations. Thus, prevention of methylmercury overexposure resulted in preservation of 600 000 IQ points, corresponding to €9 billion economy annually only due to the reduced IQ loss. Chronic arsenic toxicity is associated with decreased IQ, memory, attention, motor function, development of ADHD, and these disturbances represent up to 1/5 of the total costs of arsenic exposure. Cadmium also induces lower IQ, impaired language skills, educability, attention, social behavior, increased distractibility and predisposition to violations. In turn, manganese toxicity is also associated with IQ loss, potentiates negative effects of lead and arsenic on intellectual abilities. Manganese exposure also causes impaired language abilities, memory, attention, motor functions, as well as development of ADHD and aggressive behavior, predisposes to alcoholism and violations. Monitoring and correction of chronic toxic metal exposure on individual and populational levels allows to reduce significantly expenses on educational services, increase efficiency of education and, therefore, the intellectual level of the population.

KEYWORDS: intelligence, mercury, cadmium, lead, economic loss.