

ЗНАЧЕНИЕ БИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТОЙКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ И ОЦЕНКА ИХ ГЕНОТОКСИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В СИСТЕМЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Чеченский государственный университет (Россия, г. Грозный, ул. Киевская, д. 33);
Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России
(Россия, Санкт-Петербург, ул. Акад. Лебедева, д. 4/2)

Канцерогенность стойких органических загрязнителей (СОЗ) в настоящее время доказана, однако, вместе с тем, их генотоксические эффекты, промотирующие канцерогенез, до сих пор не определены. Рыбы внутренних водоемов – выраженные гипераккумуляторы СОЗ (главным образом диоксинов). Специально проведенный аналитический обзор посвящен влиянию СОЗ на геномную нестабильность (генотоксические эффекты) у рыб. Проведенный в обзоре литературный анализ позволяет заключить, что у рыб, обитающих в водоемах, загрязненных СОЗ, практически всегда обнаруживается повышенная геномная нестабильность, оцененная микроядерным тестом. Таким образом, следует признать возможность генотоксических эффектов СОЗ в антропогенно-загрязненной внешней среде.

Ключевые слова: экология, экологическая безопасность, стойкие органические загрязнители, генотоксичность, микроядерный тест, рыбы.

Общая характеристика. Изучение состояния природной среды, с точки зрения влияния на человека (биэкологический мониторинг), особенно важно в отношении загрязнителей, способных долгое время циркулировать в окружающей среде, перемещаться по пищевым цепям, воздействовать на иммунный и гормональный фон организма, опосредованно воздействовать на потомство.

Загрязнение стойкими органическими загрязнителями (СОЗ) в настоящее время принято считать глобальным [17, 45]. Конвенции Организации Объединенных Наций по окружающей среде (UNEP) к СОЗ относят диоксины (полихлорированные дибензопарадиоксины, ПХДД) и диоксиноподобные вещества, в том числе полихлорированные дibenзофураны (ПХДФ), полихлорированные бифенилы (ПХБ), полибромированные дibenзодиоксины (ПБДД), полихлорированные дифениловые эфиры (ПБДЭ), гексахлорбензол (ГХБ), дихлордифенилтрихлорметилметан (ДДТ) и другие хлорорганические соединения. Определен список из 12 особо опасных для природы и человека токсикантов [10]. Эти 12 групп соединений состоят из более чем 500 изомеров и гомологов, поэтому для целей мониторинга выбраны изомеры с установленной токсичностью (таблица).

Перечень соединений, рекомендованных для мониторинга СОЗ, был расширен в 2009 г. за счет введения 9 новых групп стойких органических загрязнителей: хлордекон, гексабромди-

фенил, альфа-, бета- и гамма-гексахлорциклогексан (ГХЦГ), полибромированные дифенилэфиры (ПБДЭ), октабромированные дифенилэфиры (ОБДЭ), полифторированные соединения (ПФС), пентахлорбензол [9]. По многим свойствам к группе СОЗ близки полициклические ароматические соединения (ПАУ) [38, 39].

Распространенность. Причинами загрязнения СОЗ является производство (ПХБ, пестициды), в том числе и непреднамеренное (диоксины), применение и хранение (полигоны, свалки, «горячие точки») хлорорганических соединений, стабильных в окружающей среде, токсичных для биоты (человека) и способных к транспорту (пищевые цепи и воздушный пере-

Перечень соединений, рекомендуемых UNEP
для проведения мониторинга

СОЗ	Анализируемые химические соединения
ГХБ	Гексахлорбензол
Хлордан	Цис- и транс-хлордан, цис- и транс-нонахлор, оксихлордан
Гептахлор	Гептахлор, гептахлорид
ДДТ	4,4'-ДДЕ, 4,4'-ДД, 4,4'-ДДТ
Мирекс	Мирекс
Токсаfen	Парлар № P26, P50, P62
Дизлдрин	Дизлдрин
Эндрин	Эндрин
Алдрин	Алдрин
ПХБ	ПХБ (7 соединений, № IUPAC: 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)
ПХДД/Ф	ПХБ с TEF _s (12 соединений, № IUPAC: 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189) Тетраоктахлорированные дибензопара-диоксины и дibenзофураны с замещением Cl -2, 3, 7, 8 (17 соединений)

Шахтамиров Иса Янарсаевич – зав. каф. Чеченского гос. ун-та (364907, г. Грозный, ул. Киевская, д. 33), канд. сел.-хоз. наук доц., e-mail: muti-eva01@mail.ru;

Кравцов Вячеслав Юрьевич – проф. Всерос. центра экстрен. и радиац. медицины им. А.М. Никифорова (194044, Санкт-Петербург, ул. Акад. Лебедева, д. 4/2), д-р биол. наук проф., e-mail: kvyspb@rambler.ru.

нос). ПХДД/Ф, ПХБ, а также ПАУ являются продуктами неполного сжигания, пиролиза и не-преднамеренного производства (побочные продукты реакций хлорорганического синтеза), регистрируются в продуктах тления и горения (выбросы в атмосферу, зола) и являются экотоксикантами, способными к аккумуляции в организме человека [36, 37].

ПХДД/Ф, ПХБ и ПАУ токсичны, часть из них – канцерогенны, имеют крайне низкие референтные дозы, низкие уровни допустимого суточного поступления с пищей, нормируются в воздухе атмосферы и пищевых продуктах [49, 51]. Контроль и мониторинг ситуаций с загрязнением этими соединениями является необходимой частью оценки риска здоровью человека [7, 11, 16, 24, 51]. Особенно это важно при изучении последствий военного и нефтехимического техногенеза (пожары, горение нефти) [12, 23, 36, 44].

Так, уровни загрязнения воздуха, измеренные при пожарах, достигали 50 нг/м³ ПХДД, 100 нг/м³ ПХДФ (или 3,5–7,2 нг/м³ в единицах I-TEQ ПХДД/Ф) и от 6,4 до 500 мг/м³ ПАУ (до 470 нг/м³ бенз(а)пирена в черном дыме) [15, 25]. Особенно велики концентрации ПХДД/Ф и ПАУ при пожарах в зданиях, содержащих материалы на основе поливинилхлорида (ПВХ), и при горении шин. Эти значения превосходят их фоновые уровни в атмосферном воздухе в 10 тыс. раз (ПДК ПХДД/Ф – 0,5 пг/м³, ПДК бенз(а)пирена – 1 нг/м³, в рабочей зоне – 150 нг/м³). Критическим значением в случае экспозиции при пожарах ВОЗ определила сумму для ПАУ 0,2 мг/м³ [23].

Соответственно фиксируются и повышенные концентрации ПХДД/Ф и ПАУ в диагностических жидкостях человека. Так, после инцидента во Всемирном торговом центре Нью-Йорка 11.09.2001 г. были зарегистрированы до 120,6 пг TEQ ПХДД/Ф/г в липидах крови и до 62,5 нг/л метаболита ПАУ 1-гидроксипирена в моче у пожарных [28]. Токсический эффект, включая канцерогенный, установлен для 17 токсичных конгенеров ПХДД/Ф, имеющих замещение атомами хлора в положении 2, 3, 7, 8 (например, 2-, 3-, 7-, 8-ТХДД), и выражен для некоторых соединений группы ПАУ [бенз(а)пирен, дibenз(a,l)пирен, дibenzo(a,h)антрацен] [31, 45], что подтверждено оценкой риска ингаляционного воздействия ПХДД/Ф и ПАУ [48].

К трансграничному переносу особенно склонны ПХБ, что и определяет включение этой группы приоритетных экотоксикантов в системный мониторинг состояния окружающей среды [6, 40, 51]. Загрязнение окружающей среды

ПХБ, по данным ВОЗ, в основном происходит в результате испарения из пластификаторов, образования и выделения при сжигании бытовых и промышленных отходов, а также при разрушении и возгорании трансформаторов, конденсаторов и другого промышленного оборудования, содержащего ПХБ, и неконтролируемого вывоза и захоронения промышленных отходов. ПХБ чаще всего использовали как технические жидкости, снижающие пожароопасность при производстве электрооборудования.

В настоящее время производство ПХБ в мире запрещено. Считается, что в мире произведено 1,2 млн тонн ПХБ-продукции, около $\frac{1}{3}$ которых попали в окружающую среду, остальные $\frac{2}{3}$ находятся в связанном состоянии в стадии электрооборудования и отходах [2].

Значительная часть изомеров ПХБ встречаются в объектах окружающей среды. Так, из 36 потенциально токсичных – 26 обнаруживаются в тканях рыб, птиц, млекопитающих и беспозвоночных. Выделяют 4 группы ПХБ: 1-я – непосредственно токсичные (стереоаналоги 2-, 3-, 7-, 8-тетрахлордибензопарафицина); 2-я – с высокой потенциальной токсичностью (метаболически сходные с 3-метилхолантреном); 3-я – с умеренной потенциальной токсичностью (фенобарбиталовый тип); 4-я – с минимальной потенциальной токсичностью, мало распространенные в окружающей среде или с очень слабой биокумуляцией [2–4].

Диагностика генотоксических эффектов.

В соответствии с требованиями Стокгольмской конвенции, рекомендуется вести мониторинг 12 наиболее токсичных изомеров ПХБ: моноортозамещенных, диоксиноподобных ПХБ № 77, 81, 126 и 169, а также индикаторных ПХБ № 118, 105 и др., для которых имеются нормализованные по токсичности 2-, 3-, 7-, 8-ТХДД-коэффициенты, что позволяет оценить токсичность пробы (суммарный коэффициент токсичности TEQ-WHO) и объединить результаты исследований диоксинов и ПХБ [46, 49, 51].

Как уже отмечалось ранее, канцерогенность СОЗ в настоящее время доказана, однако, вместе с тем, их генотоксические эффекты, промоториующие канцерогенез, до сих пор не определены. По последним данным одних исследований СОЗ оказывают отсроченное генотоксическое действие на организмы, в том числе и на человека [27, 30], согласно другим, самым последним, СОЗ все же дают прямой генотоксический эффект на камбимальные клетки корешков лука (*Allium cepa*) [35]. В этом же исследовании положительным оказался и другой тест на прямую генотоксичность – на *Salmonella typhimurium*.

gium, причем данные теста на бактериях коррелировали с данными тестами на растениях, а также с количеством СОЗ в образцах. Авторы этого исследования тестирували фильтраты воздуха из городских кварталов Рио-де-Жанейро [35].

В настоящее время для оценки токсичности химических соединений внешней среды, с которыми контактируют организмы, необходимо проведение 3-уровневых тестов. Тесты 1-го уровня объединяют результаты высокопропускных исследований *in vitro* с экстраполяцией полученных данных на ожидаемые эффекты *in vivo*, включая фармакокинетическое моделирование и моделирование воздействия, 2-го и 3-го – включают в себя тестиования в естественных условиях и традиционные исследования на животных [26]. В свете этих последних авторитетных директив генотоксичность и мутагенный потенциал стойких органических загрязнителей внешней среды должны быть доказаны в тестах всех 3 уровней.

Выраженные гипераккумуляторы СОЗ (главным образом диоксинов) – рыбы и дойные коровы. По этой причине единственно реальным подходом, с помощью которого можно разобраться в вопросе о генотоксичности СОЗ в естественных условиях, в которых обитают организмы, представляется изучение индуцированной нестабильности генома у рыб.

Накопление ксенобиотиков в рыбе не обязательно приводит к ее гибели, однако загрязненная рыба – один из основных источников поступления диоксинов и ПХБ в организм питающихся ими животных, птиц и человека, а концентрирование этих веществ в тканях гидробионтов способствует появлению летальных мутаций, уродств и приводит к рождению нежизнеспособной молоди. Наибольшие концентрации ксенобиотиков диоксинового ряда наблюдаются в тканях рыб, обитающих в водоемах вблизи химических, целлюлозно-бумажных и металлургических заводов [8]. Пример исследований – работы по контролю загрязнения в Венецианской лагуне (рыба и моллюски), в Великих озерах США и Канаде (рыба), Арктике (рыба, морские животные) и т.д. [14, 21]. Выявлены также видовые особенности биоаккумуляции диоксинов [34]. Изучены состав конгенеров и пространственное распределение ПХБ в донных отложениях и тканях рыбы в акватории Рыбинского водохранилища [5]. Таким образом, рыбы, обитающие в природной среде, в которой определена степень загрязнения СОЗ, являются биоиндикатором генотоксичности СОЗ, причем в тестах 3-го уровня.

Индуцированную геномную нестабильность у рыб возможно определить только одним ци-

тогенетическим методом – микроядерным тестом, поскольку классический хромосомный анализ у рыб сильно затруднен из-за сложной организации их кариома. Другой информативный метод определения генотоксических эффектов у рыб – «метод комет», основанный на данных микроэлектрофореза ДНК отдельных клеток, как правило, выполняется в совокупности с микроядерным тестом. Отметим, что объектами для исследования упомянутыми обоими методами являются ядроодержащие эритроциты.

Микроядерный тест в эритроцитах рыб надежно зарекомендовал себя в природном мониторинге мутагенов и эксперименте. Высокая чувствительность и информативность микроядерного теста в эритроцитах рыбы *Astyaulax bimaculatus* позволила установить генотоксичность микроцистинов цианобактерий изeutрофических озер [43]. Значимые различия по частоте эритроцитов с микроядрами и с аномальными ядрами обнаруживаются между интактными особями, обитающими в обычной для них среде, и особями, помещенными в водные резервуары с добавлением солей ртути [41]. Эритроциты рыб оказались очень удобным и информативным объектом в выявлении генотоксикантов не только в микроядерном teste и teste учета ядерных аномалий, но так же и в методе микроэлектрофореза индивидуальных клеток, ставшим популярным в последние годы и получившим название «метод комет» [32].

Генотоксические эффекты у рыб. Далее представим все данные, которые мы смогли получить в системах поиска научной информации, касающихся генотоксических эффектов СОЗ у рыб в естественных условиях. Итак, если представлять данные в хронологическом порядке, то к настоящему времени известно, что частота эритроцитов с микроядрами повышалась у молоди плотвы, которую содержали в течение 300 сут в сточных водах с СОЗ [22].

Сбросы бытовых и промышленных сточных вод и утилизация загрязненных илов в прибрежных водах г. Гонконга привели к высокому уровню концентраций СОЗ в толще воды, биоте и донных отложениях. Китайские исследователи из Гонконга провели серию биоиндикационных исследований на генотоксичность в жаберных лепестках мидий методом комет и микроядерным тестом. Полученные ими результаты свидетельствовали о том, что использование микроядер в качестве биомаркера является потенциально эффективным, особенно в более загрязненных местах. Тем не менее, по мнению авторов, необходимы дальнейшие исследования, чтобы проверить эффективность микро-

ядерного теста при различных полевых условиях, особенно для определения эффектов (биологического отклика) после воздействия более низкими концентрациями СОЗ [13].

В сообщении португальских экотоксикологов [42] приведены данные о том, что в мясе дикого белого леща – достоверно низкое накопление СОЗ по сравнению с теми же белыми лещами тех же товарных размеров, но выращенными в искусственных условиях. Микроядерный тест выявил, что дикие белые лещи не так подвержены генотоксическим воздействиям СОЗ, в отличие от искусственно выращенных. Выявленные генотоксические эффекты у 5 видов рыб, обитающих в промышленно загрязненных областях Мексики, по мнению авторов, проводивших это исследование, свидетельствуют о генотоксическом воздействии СОЗ и отражают степень экологического стресса у гидробионтов в загрязненных регионах [19].

Индукция микроядер и аномалий ядер в эритроцитах тропической морской рыбы *Bathygobius soporator* была убедительно показана в оценке генотоксичности факторов среди обитания (в полевых условиях) и лабораторном эксперименте (с индукцией микроядер циклофосфамидом) [18]. Микроядерный тест в исследовании этих авторов оказался эффективным в оценке степени загрязнения природной среды и воспроизводился в лабораторных условиях. Достоверно повышенные показатели микроядерного теста были зафиксированы в местах сброса промышленных стоков, при этом тест на аномалии ядер оказался неинформативным [18]. Вместе с тем, в том же году микроядерный тест в эритроцитах телапии (*Oreochromis Niloticus*) не выявил мутагенности высококонцентрированных стоков автозаправочных станций в Бразилии, даже несмотря на то, что в тестовых экспериментах произошло увеличение количества ядерных аномалий, указывающих на цитотоксичность воздействий, и увеличилась смертность рыбы [32]. Повышенные частоты возникновения эритроцитов с ядерными аномалиями, но не с микроядрами, были выявлены у рыб 9 видов, обитающих в загрязненном СОЗ районе Восточной Амазонии [29]. Стоит прокомментировать, что в данном исследовании, единственном не корреспондирующем с данными по микроядерному тесту у рыб во всех остальных цитированных работах, проверялись высоко-концентрированные стоки. Последнее обстоятельство как раз и повлияло на то, что из-за высоких концентраций генотоксический эффект СОЗ не успел проявиться из-за наступления летальности.

Исследованные частоты встречаемости микроядер в эритроцитах 7 видов рыб, обитающих в загрязненном эвтотрофном озере Параноа (Бразилия), оказались различными у травоядных и хищных рыб. У хищных видов рыб частоты встречаемости микроядер в эритроцитах, а вместе с ними частоты встречаемости аномальных эритроцитов и показатели ДНК-комет ядер эритроцитов, оказались достоверно выше, чем у травоядных рыб [20]. Важно отметить, что эти данные полностью согласуются с данными о том, что в мышцах жирной (плотоядной) рыбы диоксины накапливаются в гораздо большей концентрации, чем у травоядных рыб, обитающих в тех же водоемах, но имеющих низкий уровень жира в мышечной ткани [1]. Следовательно, для оценки генотоксичности факторов во внутренних водоемах более информативно проводить микроядерный тест в эритроцитах плотоядных рыб с высоким уровнем жира в тканях.

Заключение

Таким образом, представленные в обзоре данные полевых исследований, полученные за последние 10 лет, однозначно указывают на генотоксические (скорее не прямые, а отсроченные) эффекты на организмы, обитающие в загрязненной СОЗ внешней среде.

Литература

1. Амирова З.К., Шахтамиров И.Я. Диоксины и полихлорированные бифенилы в мышцах рыб из рек Чеченской Республики // Биология внутрен. вод. – 2013. – № 2. – С. 85–93.
2. Клюев Н.А., Бродский Е.С. Определение полихлорированных бифенилов в окружающей среде и биоте // Полихлорированные бифенилы. Супертоксиканты XXI века: Информ. вып. – М.: ВИНИТИ, 2000. – № 5. – С. 31–63.
3. Коломиец А.Ф. Полихлорциклические ксенобиотики // Успехи химии. – 1990. – № 3. – С. 536–544.
4. О рекомендациях для целей инвентаризации на территории Российской Федерации производств, оборудования, материалов, использующих или содержащих ПХБ, а также ПХБ содержащих отходов : приказ Госкомэкологии РФ от 13.04.1999 г. № 165.
5. Пространственное распределение и качественный состав полихлорированных бифенилов (ПХБ) и хлорорганических пестицидов (ХОП) в донных отложениях и леще (*Abramis brama L.*) Рыбинского водохранилища / Г.М. Чуйко, В.В. Законнов, А.А. Морозов [и др.] // Биология внутрен. вод. – 2010. – № 2. – С. 98–108.
6. Ровинский Ф.Я. Фоновый мониторинг загрязнения экосистем суши хлорорганическими соединениями. – Л. : Госгидрометиздат, 1990. – С. 132–173.

7. Румак В.С. Основы медико-биологической оценки опасности диоксинов / Диоксины – супертоксиканты XXI века // Медико-биологические проблемы. – 1998. – Информ. вып. № 4. – 111 с.
8. Стойкие органические загрязнители в бассейне озера Байкал (аналит. обзор) / В.Б. Батоев, О.В. Цыденова, Г.Г. Нимацыренова [и др.]. – Новосибирск : Изд-во Сиб. отд. РАН, 2004. – 110 с.
9. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях: текст и приложения Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), Швейцария. – Женева, 2009. – 53 с.
10. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях: текст и приложения Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), Швейцария. – Женева, 2001. – 53 с.
11. Худолей В.В. Канцерогены: характеристики, закономерности, механизмы действия. – СПб., 1999. – 419 с.
12. Amirova Z. The level of PCDD/Fs pollution in the environmental objects from the places of military operations in the Republic of Yugoslavia // Organohal. Comp. – 2000. – Vol. 46. – P. 362–365.
13. Application of the comet assay in erythrocytes of *Oreochromis niloticus* (Pisces): A methodological comparison / C. Oliveira-Martins, J. David [et al.] // Genet. Mol. Biol. – 2009. – Vol. 32, N 1 – P. 155–158.
14. Arctic Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). – Oslo, 2002. – 111 p.
15. Austin C. Wildland Firefighter Health Risks and Respiratory Protection // Claire Studies and Research Projects. – Montréal, 2008. – 8 p.
16. Birnbaum L.S. Health effects of polybrominated dibenzo-p-dioxins (PBDDs) and dibenzofurans (PBDFs) // Environ. Int. – 2003. – Vol. 29. – P. 855–860.
17. El-Shahawi M., Bashammakh A., Al-Saggaf W. An overview on the accumulation, distribution, transformation, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants // Atlanta. – 2010. – N 5. – P. 1586–1597.
18. Galindo T., Moreira L. Evaluation of genotoxicity using the micronucleus assay and nuclear abnormalities in the tropical sea fish *Bathygobius soporator* (Valenciennes, 1837) (Teleostei, Gobiidae) // Genet. Mol. Biol. – 2009. – Vol. 32, N 2. – P. 394–398.
19. González D., Hernández L., Reyes. Exposure to persistent organic pollutants (POPs) and DNA damage as an indicator of environmental stress in fish of different feeding habits of Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico // Ecotoxicology. – 2010. – Vol. 19, N 7. – P. 1238–1248.
20. Grisolía C., Carla L., Rivero G. Profile of micronucleus frequencies and DNA damage in different species of fish in a eutrophic tropical lake // Genet. Mol. Biol. – 2009. – Vol. 32, N 1. – P. 138–143.
21. Johnson A., Seiders K., Norton D. An Assessment of the PCB and Dioxin Background in Washington Freshwater Fish. – Washington : Depart. Ecol. Olympia, 2010. – 78 p.
22. Health Effects in Fish of Long-Term Exposure to Effluents from Wastewater Treatment Works / K. Liney, J. Hagger, C. Tyler [et al.] // Environ Health Perspect. – 2006. – Vol. 114, N 1 – P. 81–89.
23. IARC WHO. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Painting, firefighting, and shift work / Int. Agency for Research on Cancer. – 2010. – Vol. 98. – P. 397–559.
24. IARC WHO. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Polychlorinated dibenzo-para-dioxins and polychlorinated dibenzofurans / Int. Agency for Research on Cancer. – 1997. – Vol. 69. – 423 p.
25. IARC WHO. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures / Int. Agency for Research on Cancer. – 2010. – Vol. 92. – P. 754–773.
26. Incorporating New Technologies Into Toxicity Testing and Risk Assessment : Moving From 21st Century Vision to a Data-Driven Framework / R. Thomas, M. Philbert, S. Auerbach [et al.] // Toxicol. Sci. – 2013. – Vol. 136, N 1. – P. 4–18.
27. Korkalainen M., Huumonen K. Dioxin Induces Genomic Instability in Mouse Embryonic Fibroblasts [Electronic resource] // PLoS One. – 2012 – Vol. 7, N 5. – e37895.
28. Lorber M. Assessment of dioxin inhalation exposures and potential health impacts following the collapse of the world trade center towers/Organo-halogen Compounds. – Boston : Dioxin, 2003. – P. 60–65.
29. Melo K., Alves I., Pieczarka J. Profile of micronucleus frequencies and nuclear abnormalities in different species of electric fishes (Gymnotiformes) from the Eastern Amazon // Genet. Mol. Biol. – 2013. – Vol. 36, N 3 – P. 425–429.
30. Micronucleus frequency in children exposed to biomass burning in the Brazilian Legal Amazon region: a control case study [Electronic resource] / H. Sisenando., S. De Medeiros., P. Artaxo [et al.] // BMC Oral. Health. – 2012. – Vol. 12, N 6.
31. Neubert D., Brambilla P., Mocarelli P. Effects of dioxins in humans and correlation with animal data // Organohal. Comp. – 1999. – Vol. 42. – P. 205–221.
32. Oliveira-Martins C., Grisolía C.K. Toxicity and genotoxicity of wastewater from gasoline stations // Genet. Mol. Biol. – 2009. – Vol. 32, N 4. – P. 853–856.
33. Organochlorine bioaccumulation and biomarkers levels in culture and wild white seabream (*Diplodus sargus*) / M. Ferreira, P. Antunes, J. Costa [et al.] // Chemosphere. – 2008. – Vol. 73, N 10. – P. 1669–1674.
34. Polychlorinated Dibenzofurans and Polychlorinated Dibenzo_p_dioxins in Great Lakes Fish: A Baseline and Interlake Comparison / D. De Vault, W. Dunn, P. Bergqvist [et al.] // Environ. Toxicol. and Chem. – 1989. – Vol. 8, N 11. – P. 1013–1022.
35. Rainho C., Corrêa S. Genotoxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Nitro-Derived in Respirable Airborne Particulate Matter Collected from Urban Areas of Rio de Janeiro (Brazil) [Electronic resource] // Biomed. Res. Int. – 2013. – 765352.

36. Schecter A. Capacity Building and Institutional Development Program for Environmental Management in Dioxins // Progress Report. An overview Environ. Results. 2006. – Kabul, 2008. – 10 p.
37. Schecter A. Exposure assessment measurement of dioxins and related chemicals in human tissues // Dioxins and Health. – New York : Plenum Press, 1994. – P. 449–485.
38. Sexton K. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Maternal and Umbilical Cord Blood from Pregnant Hispanic Women Living in Brownsville // Texas Int. J. of Environmental Research and Public Health. – 2011. – Vol. 8. – P. 3365–3379.
39. Singh V. Blood levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in women with Benign and Malignant lesions. A case-control study // Asian J. of Medical Sciences. – 2010. – Vol. 1. – P. 80–86.
40. Skotvold T., Savinov V. Regional distribution of PCBs and presence of technical PCB mixtures in sediments from Norwegian and Russian Arctic lakes // Science of the Total Environment. – 2003. – Vol. 305. – P. 85–97.
41. Studies of micronuclei and other nuclear abnormalities in red blood cells of *Colossoma macropomum* exposed to methylmercury / C.A. Da Rocha, L.A. Da Cunha, R.H. Da Silva // Genet. Mol. Biol. – 2011. – Vol. 34, N 4. – P. 694–697.
42. The use of selected genotoxicity assays in green-lipped mussels (*Perna viridis*): a validation study in Hong Kong coastal waters / S. Siu, P. Lam, M. Martin [et al.] // Mar Pollut Bull. – 2008. – Vol. 57, N 6. – P. 479–492.
43. Toxicity and genotoxicity in *Astyanax bimaculatus* (Characidae) induced by microcystins from a bloom of *Microcystis* spp / R.H. Da Silva, C.K. Grisolia [et al.] // Genet. Mol. Biol. – 2010. – Vol. 33, N 4. – P. 750–755.
44. UNEP Chemicals. Asia Toolkit Project o Inventories of Dioxin and Furan Releases / National PCDD/PCDF Inventories. – 2003. – 226 p.
45. UNEP Chemicals. POPs – Regulatory actions and guidelines concerning persistent organic pollutants / United Nations Environment Programme. – Geneva, 1998. – 267 p.
46. USEPA. 2, 3, 7, 8-Tetrachlorodibenzo-P-Dioxin (TCDD) Dose-Response Studies: Preliminary Literature Search Results and Request for Additional Studies / US Environmental Protection Agency. – Washington, 2008. – 119 p.
47. USEPA. The Inventory of Sources of Dioxin in the United States / External Review Draft. – 2005. – P. 3.
48. USEPA. EPA's Reanalysis of Key Issues Related to Dioxin Toxicity and Response to NAS Comments. – 2012. – Vol. 1. – 78 p.
49. Van den Berg M. The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds // Toxicological Sciences. – 2006. – N 2. – P. 223–241.
50. Vancouver Lake PCBs, Chlorinated Pesticides, and Dioxins in Fish Tissue and Sediment / R. Coots [et al.]. – Washington : Depart. Ecol., 2007. – 53 p.
51. WHO. Assessment of the health risk of dioxins: re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI). – Geneva, 1998. – 28 p.

Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psichologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh [Medical-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations]. – 2014. – N 1. – P. 85–92.

Shakhtamirov I.Ya., Kravtsov V.Yu. Znachenie bioekologicheskogo monitoringa stoykikh organicheskikh zagryazniteley i otsenka ikh genotoksicheskikh effektov v sisteme ekologicheskoy bezopasnosti [Value bioecological monitoring and genotoxicity of persistent organic pollutants (POP) for environmental safety].

Chechen State University (364907, Russia, Grozny, Kievskaya Str., 33);
The Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia
(194044, Russia, Saint-Petersburg, Academica Lebedeva Str., 4/2)

Shakhtamirov Isa Yanarsayevich – PhD on Agric. Sci., Head of the Department, Chechen State University (364907, Russia, Grozny, Kievskaya Str., 33); e-mail: muti-eva01@mail.ru;

Kravtsov Vyacheslav Yur'yevich – Dr. Biol. Sci., Prof., The Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia (194044, Russia, St. Petersburg, Academica Lebedeva Str., 4/2); e-mail: kyspb@rambler.ru.

Abstract. Currently, cancerogenic ability of persistent organic pollutants (POPs) has been proven, however their genotoxic effects promoting cancerogenesis has not been validated. Fish of inland waters are POPs hyperaccumulators (mainly dioxins). Effect of POPs on genomic instability (genotoxic effects) in fish was the topic of a specially conducted analytical review. Literature search allows for making conclusion that in fish living in POPs polluted waters, higher genomic instability revealed by micronucleus test has often been demonstrated. Thus, possibility of genotoxic effects of POPs in antropogenically polluted environment should be admitted.

Keywords: ecology, ecological safety, persistent organic pollutants, genotoxicity, micronucleus test, fish.

References

- Amirova Z.K., Shakhtamirov I.Ya. Dioksiny i poliklorirovannye bifenily v myshtsakh ryb iz rek Chechenskoi Respubliki [Dioxins and polychlorinated biphenyls in fish muscles from rivers of the Chechen Republic] *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biology]. 2013. N 2. P. 85–93. (In Russ.)
- Klyuev N.A., Brodskii E.S. Opredelenie poliklorirovannyykh bifenilov v okruzhayushchsei srede i biote. Dioksiny. Supertoksikanty XXI veka [Determination of polychlorinated biphenyls in the environment and biota. Dioxins. Supertoxicants of XXI century]. Moskva. 2000. Vol. 5: *Poliklorirovannye bifenily* [Polychlorinated biphenyls]. P. 31–63. (In Russ.)

3. Kolomiyets A.F. Polikhlortsiklichekskiye ksenobiotiki [Polychlorcyclic xenobiotics]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews]. 1990. N 3. P. 536–544. (In Russ.)
4. O rekomendatsiyakh dlya tselei inventarizatsii na territorii Rossiiskoi Federatsii proizvodstv, oborudovaniya, materialov, ispol'zuyushchikh ili soderzhashchikh PKhB, a takzhe PKhB soderzhashchikh otkhodov : prikaz Goskomekologii RF ot 13.04.1999 N 165 [About recommendations for inventory on the territory of the Russian Federation on production, equipment, materials, containing or PCBs and PCB-containing wastes : the order of the state ecological Committee of the Russian Federation from 13.04.1999 N 165]. (In Russ.)
5. Chuyko G.M., Zakonnov V.V., Morozov A.A. [et al.]. Prostranstvennoe raspredelenie i kachestvennyi sostav polikhlorirovannyykh bifenilov (PKhB) i khlororganicheskikh pestitsidov (KhOP) v donnykh otlozhennyakh i leshche (Abramis brama L.) Rybinskogo vodokhranilishcha [Spatial distribution and qualitative composition of polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPS) in the bottom sediments and the bream (Abramis brama L.) Rybinsk reservoir]. *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biology]. 2010. N 2. P. 98–108. (In Russ.)
6. Rovinskii F.Ya. Fonovy monitoring zagryazneniya ekosistem sushi khlororganicheskimi soedineniyami [Background monitoring of ecosystems pollution by organochlorines]. Leningrad. 1990. P. 132–173. (In Russ.)
7. Rumak V.S. Osnovy mediko-biologicheskoi otsenki opasnosti dioksinov [Fundamentals of biomedical risk assessment of dioxins]. Dioksiny. Supertoksikanty XXI veka [Dioxins. Supertoxicants of XXI century]. Moskva. 1998. Vol. 4: *Mediko-biologicheskie problemy* [Medical-biological problems]. 111 p. (In Russ.)
8. Batoev V.B., Tsydenova O.V., Nimatsyrenova G.G. [et al.]. Stoikie organicheskie zagryazniteli v basseine ozera Baikal (analit. obzor) [Persistent organic pollutants in the basin of lake Baikal (analytical overview)]. Novosibirsk. 2004. 110 p. (In Russ.)
9. Stokgol'mskaya konvensiya o stoikikh organicheskikh zagryaznitelyakh: tekst i prilozheniya Programmy Organizatsii Ob'edinennykh Natsii po okruzhayushchey srede (YuNEP), Shveitsariya [Stockholm Convention on persistent organic pollutants: text and supplement to the United Nations Programme on environment (UNEP), Switzerland]. Zheneva, 2009. 53 p. (In Russ.)
10. Stokgol'mskaya konvensiya o stoikikh organicheskikh zagryaznitelyakh: tekst i prilozheniya Programmy Organizatsii Ob'edinennykh Natsii po okruzhayushchey srede (YuNEP), Shveitsariya [Stockholm Convention on persistent organic pollutants: text and supplement to the United Nations Programme on environment (UNEP), Switzerland]. Zheneva, 2001. 53 p. (In Russ.)
11. Khudolei V.V. Kantserogeny: kharakteristiki, zakonomernosti, mekhanizmy deistviya [Carcinogens: characteristics, patterns, mechanisms of action]. Sankt-Peterburg. 1999. 419 p. (In Russ.)
12. Amirova Z. The level of PCDD/Fs pollution in the environmental objects from the places of military operations in the Republic of Yugoslavia. *Organohal. Comp.* 2000. Vol. 46. P. 362–365.
13. Oliveira-Martins C., David J. [et al.]. Application of the comet assay in erythrocytes of Oreochromis niloticus (Pisces): A methodological comparison. *Genet. Mol. Biol.* 2009. Vol. 32, N 1 P. 155–158.
14. Arctic Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). Oslo, 2002. 111 p.
15. Austin C. Wildland Firefighter Health Risks and Respiratory Protection. *Claire Studies and Research Projects*. Montréal, 2008. 8 p.
16. Birnbaum L.S. Health effects of polybrominated dibenzo-p-dioxins (PBDDs) and dibenzofurans (PBDFs). *Environ. Int.* 2003. Vol. 29. P. 855–860.
17. El-Shahawi M., Bashammakh A., Al-Saggaf W. An overview on the accumulation, distribution, transformation, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants. *Atlanta*. 2010. N 5. P. 1586–1597.
18. Galindo T., Moreira L. Evaluation of genotoxicity using the micronucleus assay and nuclear abnormalities in the tropical sea fish Bathygobius soporator (Valenciennes, 1837) (Teleostei, Gobiidae). *Genet. Mol. Biol.* 2009. Vol. 32, N 2. P. 394–398.
19. González D., Hernández L., Reyes. Exposure to persistent organic pollutants (POPs) and DNA damage as an indicator of environmental stress in fish of different feeding habits of Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico. *Ecotoxicology*. 2010. Vol. 19, N 7. P. 1238–1248.
20. Grisolia C. Carla L., Rivero G. Profile of micronucleus frequencies and DNA damage in different species of fish in a eutrophic tropical lake. *Genet. Mol. Biol.* 2009. Vol. 32, N 1. P. 138–143.
21. Johnson A., Seiders K., Norton D. An Assessment of the PCB and Dioxin Background in Washington Freshwater Fish. Washington : Depart. Ecol. Olympia, 2010. 78 p.
22. Liney K., Hagger J., Tyler C. [et al.]. Health Effects in Fish of Long-Term Exposure to Effluents from Wastewater Treatment Works. *Environ Health Perspect.* 2006. Vol. 114, N 1. P. 81–89.
23. IARC WHO. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Painting, firefighting, and shift work. *Int. Agency for Research on Cancer*. 2010. Vol. 98. P. 397–559.
24. IARC WHO. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Polychlorinated dibenzo-para-dioxins and polychlorinated dibenzofurans. *Int. Agency for Research on Cancer*. 1997. Vol. 69. 423 p.
25. IARC WHO. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. *Int. Agency for Research on Cancer*. 2010. Vol. 92. P. 754–773.
26. Thomas R., Philbert M., Auerbach S. [et al.]. Incorporating New Technologies Into Toxicity Testing and Risk Assessment : Moving From 21st Century Vision to a Data-Driven Framework. *Toxicol. Sci.* 2013. Vol. 136, N 1. P. 4–18.
27. Korkkalainen M., Huumonen K. Dioxin Induces Genomic Instability in Mouse Embryonic Fibroblasts [Electronic resource]. PLoS One. 2012. Vol. 7, N 5. e37895.
28. Lorber M. Assessment of dioxin inhalation exposures and potential health impacts following the collapse of the world trade center towers. *Organohalogen Compounds*. Boston : Dioxin, 2003. P. 60–65.
29. Melo K., Alves I., Pieczarka J. Profile of micronucleus frequencies and nuclear abnormalities in different species of electric fishes (Gymnotiformes) from the Eastern Amazon. *Genet. Mol. Biol.* 2013. Vol. 36, N 3. P. 425–429.
30. Sisenando H., De Medeiros S., Artaxo P. [et al.]. Micronucleus frequency in children exposed to biomass burning in the Brazilian Legal Amazon region: a control case study [Electronic resource]. *BMC Oral. Health.* 2012. Vol. 12, N 6.

31. Neubert D., Brambilla P., Mocarelli P. Effects of dioxins in humans and correlation with animal data. *Organohal. Comp.*. 1999. Vol. 42. P. 205–221.
32. Oliveira-Martins C., Grisolia C.K. Toxicity and genotoxicity of wastewater from gasoline stations. *Genet. Mol. Biol.* 2009. Vol. 32, N 4. P. 853–856.
33. Ferreira M., Antunes P., Costa J. [et al.]. Organochlorine bioaccumulation and biomarkers levels in culture and wild white seabream (*Diplodus sargus*). *Chemosphere*. 2008. Vol. 73, N 10. P. 1669–1674.
34. Vault D.De, Dunn W., Bergqvist P. [et al.]. Polychlorinated Dibenzofurans and Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins in Great Lakes Fish: A Baseline and Interlake Comparison. *Environ. Toxicol. and Chem.* 1989. Vol. 8, N 11. P. 1013–1022.
35. Rainho C., Correa S. Genotoxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Nitro-Derived in Respirable Airborne Particulate Matter Collected from Urban Areas of Rio de Janeiro (Brazil) [Electronic resource]. *Biomed. Res. Int.* 2013. 765352.
36. Schecter A. Capacity Building and Institutional Development Program for Environmental Management in Dioxins. *Progress Report. An overview Environ. Results.* 2006. Kabul, 2008. 10 p.
37. Schecter A. Exposure assessment measurement of dioxins and related chemicals in human tissues. *Dioxins and Health*. New York : Plenum Press, 1994. P. 449–485.
38. Sexton K. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Maternal and Umbilical Cord Blood from Pregnant Hispanic Women Living in Brownsville. *Texas Int. J. of Environmental Research and Public Health*. 2011. Vol. 8. P. 3365–3379.
39. Singh V. Blood levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in women with Benign and Malignant lesions. A case-control study. *Asian J. of Medical Sciences*. 2010. Vol. 1. P. 80–86.
40. Skotvold T., Savinov V. Regional distribution of PCBs and presence of technical PCB mixtures in sediments from Norwegian and Russian Arctic lakes. *Science of the Total Environment*. 2003. Vol. 305. P. 85–97.
41. Da Rocha C.A., Da Cunha L.A., Da Silva R.H. Studies of micronuclei and other nuclear abnormalities in red blood cells of *Collossoma macropomum* exposed to methylmercury. *Genet. Mol. Biol.* 2011. Vol. 34, N 4. P. 694–697.
42. Siu S., Lam P., Martin M. [et al.]. The use of selected genotoxicity assays in green-lipped mussels (*Perna viridis*): a validation study in Hong Kong coastal waters. *Mar Pollut Bull.* 2008. Vol. 57, N 6. P. 479–492.
43. Da Silva R.H., Grisolí C.K. [et al.]. Toxicity and genotoxicity in *Astyanax bimaculatus* (Characidae) induced by microcystins from a bloom of *Microcystis* spp. *Genet. Mol. Biol.* 2010. Vol. 33, N 4. P. 750–755.
44. UNEP Chemicals. Asia Toolkit Project o Inventories of Dioxin and Furan Releases *National PCDD/PCDF Inventories*. 2003. 226 p.
45. UNEP Chemicals. POPs – Regulatory actions and guidelines concerning persistent organic pollutants. *United Nations Environment Programme*. Geneva. 1998. 267 p.
46. USEPA. 2, 3, 7, 8-Tetrachlorodibenzo-P-Dioxin (TCDD) Dose-Response Studies: Preliminary Literature Search Results and Request for Additional Studies. *US Environmental Protection Agency*. Washington. 2008. 119 p.
47. USEPA. The Inventory of Sources of Dioxin in the United States. External Review Draft. 2005. P. 3.
48. USEPA. EPA's Reanalysis of Key Issues Related to Dioxin Toxicity and Response to NAS Comments. 2012. Vol. 1. 78 p.
49. Van den Berg M. The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds. *Toxicological Sciences*. 2006. N 2. P. 223–241.
50. Coots R. [et al.]. Vancouver Lake PCBs, Chlorinated Pesticides, and Dioxins in Fish Tissue and Sediment. *Washington : Depart. Ecol.* 2007. 53 p.
51. WHO. Assessment of the health risk of dioxins: re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI). Geneva. 1998. 28 p.