



БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ

УДК 504.75; 311.2

**Г. С. Ширапова, С. В. Морозов,
В. Б. Батоев, М. И. Богачев**

МОНИТОРИНГ СТОЙКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ЭКОСИСТЕМЕ ДЕЛЬТЫ РЕКИ*

Рассматриваются методика и результаты мониторинга стойких органических загрязнителей (СОЗ) в экосистеме дельты реки и оценка их возможного неблагоприятного эффекта. Приводятся данные определенных уровней СОЗ в пробах поверхностной воды, донных отложений дельты реки, определения эколого-биологических и морфологических особенностей популяции рыб. Проведен анализ полученных данных в интересах выявления закономерностей поступления, распределения и аккумуляции СОЗ в экосистеме дельты реки, определения потенциалов биоаккумуляции стойких органических загрязнителей и уровня биомагнификации при переходе от низшего к высшему трофическому уровню пищевой цепи и их влияния на живые организмы.

Экологический мониторинг, стойкие органические загрязнители, экосистема, дельта реки, донные отложения, биоаккумуляция

Ухудшение состояния окружающей природной среды, изменение и деградация природных экосистем и условий жизни населения ведут к появлению реальной экологической опасности с далеко идущими и непредсказуемыми последствиями для существования человечества. Отсюда – постоянно возрастающее внимание человеческого общества к экологическим проблемам и усилия, предпринимаемые для сохранения окружающей природной среды со всеми ее свойствами и разнообразием. Все более востребованными и перспективными становятся исследования состояния окружающей природной среды и оценки возможного неблагоприятного эффекта на живые организмы.

Река Селенга является самым крупным притоком озера Байкал, в среднем за год она приносит в озеро около 30 км³ воды, что обеспечивает 53 % всего водного притока. Селенга берет свое начало в Республике Монголия и образуется слиянием рек Идэр и Мурэн. Длина Селенги (от истока Идэра) – 1024 км, 409 км нижнего течения – на территории России. При впадении в озеро она образует обширную дельту, общая площадь которой составляет 546 км² [1].

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (мероприятие 1.4) на 2009–2013 гг. (соглашение № 14.B37.21.0180 от 23.07.2012).

На Селенге расположены города Сухэ-Батор (Монголия), Улан-Удэ и поселок городского типа Селенгинск (Россия); судоходство осуществляется до Сухэ-Батора. В результате внутриконтинентального расположения дельта р. Селенги представляет единственный в мире объект, где крупная речная система впадает в пресный водоем. Дельта р. Селенги является естественным биофильтром и индикатором современного экологического состояния озера Байкал, в связи с чем она внесена в список уникальных природных явлений планетарной значимости и входит в Центральную охранную зону Байкала, объявленную участком всемирного наследия ЮНЕСКО.

Река Селенга является одним из главных источников поступления в озеро Байкал загрязняющих веществ. В непосредственной близости от района ее дельты функционируют крупные индустриальные предприятия, такие как Селенгинский целлюлозно-картонный комбинат и Тимлюйский завод асбестоцементных изделий, достаточно развито сельское хозяйство, также поставляющее загрязняющие вещества. На экосистему самого озера и дельты р. Селенги негативно влияют изменения уровня озера, определяемые деятельностью Иркутской ГЭС.

В связи с этим большое значение приобретают исследования состояния экосистемы дельты р. Селенги, степени ее трансформации под влиянием антропогенной нагрузки и глобальных экологических процессов.

Стойкие органические загрязнители – органические соединения природного и антропогенного происхождения, которые обладают токсическими свойствами, устойчивы к фотолитическому, химическому и биологическому разложению, характеризуются высокой степенью биоаккумуляции в экосистемах, особенно в жировых тканях живых организмов. Характерной особенностью СОЗ является трансграничный перенос на большие расстояния. Большинство этих веществ обладает рядом общих свойств с точки зрения влияния на здоровье населения и окружающую природу. Они могут приводить к нарушениям репродуктивной и гормональной систем, иммунного статуса, к онкологическим заболеваниям и обладают отдаленными негативными последствиями.

Двенадцать соединений были включены в Стокгольмскую конвенцию о стойких органических загрязнителях:

- 1) дихлор-дифенил-трихлорэтан (ДДТ),
- 2) альдрин,
- 3) дильдрин,
- 4) эндрин,
- 5) хлордан,
- 6) мирекс,
- 7) токсафен,
- 8) гептахлор,
- 9) полихлорбифенилы (ПХБ),
- 10) гексахлорбензол (ГХБ),
- 11) полихлордибензодиоксины (ПХДД),
- 12) полихлордибензофураны (ПХДФ).

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – приоритетные загрязнители в списках ЕС и ЕРА.

Первая группа (1–8) – это устаревшие и запрещенные к применению пестициды. Все они, кроме ДДТ, не только давно запрещены, но и производство их прекращено. Остались только неизрасходованные запасы в хранилищах и загрязненные ими почвы. Хорошо известный препарат ДДТ стоит особняком, так как многие страны до сих пор используют его против опасных насекомых, переносчиков таких болезней, как малярия (Индия, некоторые страны Африки, Центральной и Южной Америки) или клещевой энцефалит (Россия). Вторая группа (9–10) включает промышленные продукты, которые используются в настоящее время. К ним относятся ПХБ, которые больше не производятся, а в ряде стран их производство запрещено. В России их не менее 30 тыс. т. на складах или в технических устройствах (трансформаторах, конденсаторах и др.). В эту группу входит 209 соединений, содержащих от одного до восьми атомов хлора. ПХБ устойчивы, токсичны, способны к бионакоплению. Они могут накапливаться в жировых тканях животных и человека и существовать там долгое время. Высокохлорированные ПХБ более устойчивы и рассматриваются как наносящие существенный вред окружающей среде. По крайней мере треть произведенных в мире ПХБ и попали в окружающую среду. Остальные две трети находятся в старом электрооборудовании и отходах. Вместе с тем ПХБ являются побочными продуктами процессов сжигания отходов и всех промышленных процессов, включающих использование хлора. ПХБ и другие хлорорганические соединения были обнаружены даже в тканях животных, обитающих в нетронутых диких ландшафтах – китов, тюленей, белых медведей. ГХБ используется в России в пиротехнических составах и продолжает производиться. Его применяли также в качестве пестицида и гербицида. ГХБ устойчив, токсичен, способен к бионакоплению. Третья группа – диоксины и фураны. Эти вещества не производятся и не используются, но они постоянно образуются при любых процессах, включающих использование хлора (например, целлюлозно-бумажное производство), и особенно – при высокотемпературных процессах (сжигание мусора, металлургические производства и т. п.). Для оценки экологического риска в список приоритетных полициклических ароматических углеводородов Американским агентством по защите окружающей среды (EPA US) включены 16 соединений, которые формируют основной фон загрязнения ПАУ [2].

Таким образом, можно выделить основные пути поступления СОЗ в экосистемы [3]:

- производственные процессы в горнодобывающей, химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной, металлургической и других отраслях промышленности, особенно те, в которых используется хлор и хлорсодержащие соединения;
- использование продукции (полимеры, красители, упаковочные материалы, растворители и др.), содержащей СОЗ;
- несовершенство технологий очистки воды, утилизации и захоронения промышленных, медицинских и бытовых отходов;
- применение в сельском хозяйстве хлорсодержащих пестицидов;
- поступление в живые организмы с пищевыми продуктами.

Донные отложения традиционно используются в качестве индикатора для выявления состава, интенсивности и масштаба техногенного загрязнения водных экосистем [4].

Мониторинг следовых количеств токсичных веществ в водной среде с применением биологических индикаторов хорошо зарекомендовал себя во всем мире. Специальные про-

граммы мониторинга остаточных количеств СОЗ были начаты в 1960-х гг. с использованием различных организмов – рыб, птиц, моллюсков и млекопитающих, и было показано, что живые организмы являются лучшими индикаторными видами.

С точки зрения построения моделей биоаккумуляции наиболее перспективны исследования накопления и распределения СОЗ в различных тканях и органах рыб, повсеместно распространенных в водных экосистемах и играющих ведущую роль в трофических цепях, поскольку выполняют роль переноса вещества и энергии от нижнего к верхнему трофическому уровню [5]. Многие из общих биомаркерных критериев, например изменения уровней ферментов и белков, могут быть объяснены благодаря избирательной токсичности различных химических воздействий на рыб. Благодаря данным показателям рыбы рассматриваются в качестве наиболее предпочтительных объектов для исследования биоаккумуляционных характеристик и возможных эффектов действия загрязнителей в водных экосистемах.

Целью данного исследования являлось установление современного уровня загрязнения экосистемы дельты р. Селенги стойкими органическими загрязнителями для оценки антропогенного воздействия на состояние экосистемы Байкальской природной территории. При этом решались следующие основные задачи:

- установление уровня загрязнения стойкими органическими загрязнителями экосистемы дельты р. Селенги;
- идентификация источников поступления стойких органических загрязнителей в исследуемую водную экосистему;
- оценка качества донных отложений и поверхностных вод в этих экосистемах;
- исследование возможности использования щуки *Esox lucius* в качестве биоиндикатора загрязнения стойкими органическими загрязнителями водных экосистем.

Объектами исследования являлись пробы поверхностной воды, донных отложений и образцы тканей щуки, отобранные в дельте реки Селенги.

Во всех исследованных образцах идентифицированы и количественно определены методом хромато-масс-спектрометрии следующие СОЗ: хлорорганические пестициды ди-хлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты (п,п'-ДДЭ, п,п'-ДДД), изомеры гексахлорциклогексана (α -ГХЦГ, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, δ -ГХЦГ), гексахлорбензол (ГХБ), а также полихлорированные бифенилы (ПХБ), альдрин и дильдрин не были обнаружены.

Для оценки экологического состояния поверхностных вод рассматриваемых экосистем было проведено сравнение полученных результатов с нормативами стойких органических загрязнителей для воды. Во всех образцах содержание бенз(а)пирена, ГХЦГ, ДДТ и ГХБ не превышало предельно допустимых концентраций для питьевой воды, рыбохозяйственных водоемов и водных объектов хозяйствственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Содержание ПХБ в 12 % отобранных проб поверхностных вод дельты превышало предельно допустимые концентрации ПХБ для рыбохозяйственных водоемов. Данный факт свидетельствует о возможности накопления полихлорированных бифенилов водными организмами.

Содержание ПХБ, изомеров ГХЦГ, ДДТ и его метаболитов в донных отложениях дельты р. Селенги относительно невысоко, но содержание ПАУ, ГХБ превышает загрязнение арктических районов.

Оценка экологического состояния (качества) донных отложений исследуемой водной экосистемы была проведена с использованием интегральной методики, которая применяется при оценке качества донных отложений пресноводных экосистем Северной Америки [6], [7], поскольку в России отсутствуют соответствующие экологические нормативы.

При оценке экологического состояния учитываются значения пороговых эффективных концентраций загрязнителей, уровни наименьшего негативного влияния и уровни значительного негативного влияния на водные организмы. Негативного влияния на водные организмы не происходит в случае, если содержание загрязнителя в донных отложениях не превышает значений пороговых концентраций. Уровни наименьшего негативного влияния оказывают концентрации, при которых начинает проявляться влияние антропогенных загрязнителей на водные организмы. Присутствие соединений в концентрациях сравнимых с уровнями значительного влияния или выше их, указывает на то, что неблагоприятные последствия чаще происходят, чем не происходят.

Результаты сравнения содержаний стойких органических загрязнителей в донных отложениях дельты реки Селенги с принятыми критериями свидетельствуют о том, что наиболее вероятное токсичное воздействие на биоту водоема связано с Σ ГХЦГ, Σ ДДТ, Σ ПХБ и Σ ПАУ.

Для определения источников поступления ДДТ в экосистему нами были использованы соотношения концентраций ДДТ и его метаболитов в донных отложениях и поверхностных водах дельты р. Селенги. Интервалы значений соотношений концентраций $(\text{ДДД} + \text{ДДЭ})/\Sigma \text{ДДТ}$ составили от 0,4 до 1,7; $\text{ДДД}/\text{ДДЭ}$ от 0,2 до 3,5. Известно, что соотношение $(\text{ДДД} + \text{ДДЭ})/\Sigma \text{ДДТ} > 0,5$ указывает на поступление ДДТ, главным образом в результате вымывания и выветривания ранее внесенного ДДТ из сельскохозяйственных почв. Соотношение $\text{ДДД}/\text{ДДЭ} < 1,0$ характерно для биодеструкции ДДТ преимущественно при аэробных условиях [8], [9]. Полученные интервалы, скорее всего, обусловлены интенсивным использованием ДДТ в сельском хозяйстве Байкальского региона в прошлом, а также атмосферным переносом из стран, производящих и использующих ДДТ в наши дни (Китай, Индия).

Для идентификации источников ПАУ использовались соотношения фенантрен/антрацен и флуорантен/пирен, антрацен/(антрацен+фенантрен) и флуорантен/(флуорантен+пирен). Известно, что источники ПАУ подразделяются по происхождению на ПАУ пиролитического и петрогенного происхождения. Полученные значения соотношений фенантрен/антрацен и флуорантен/пирен для образцов донных отложений дельты изменяются в интервале от 3,87 до 40,90 и от 1,01 до 2,79 соответственно. Значения соотношений антрацен/(антрацен+фенантрен) и флуорантен/(флуорантен+пирен) для исследуемых образцов составили 0,02...0,18 и 0,50...0,74 соответственно, что свидетельствует о наличии локальных источников пиролитической и петрогенной природы [10], [11].

Для установления источников поступления ПХБ в экосистему дельты реки Селенги сравнили содержание ди-, три-, тетра-, пента-, гекса-, гептаклорбифенилов в составе Σ ПХБ в донных отложениях дельты и технических смесях «Совол» и «Трихлордифенил»

(ТХД). Сравнение спектров соединений с разным числом атомов хлора показало, что в донных отложениях дельты преобладают высокохлорированные ПХБ – тетра-, пента- и гексахлорбифенилы, процентное соотношение которых в большей степени соответствует технической смеси «Совол», чем техническому продукту – ТХД [12].

Таким образом, ПХБ, обнаруженные в донных отложениях дельты р. Селенги, имеют локальное происхождение, поскольку в спектре соединений присутствуют ПХБ с большим числом атомов хлора, а для глобального переноса характерны более летучие ПХБ с малым числом атомов хлора.

Впервые для Байкальской природной территории в качестве универсального биоиндикатора нами была использована щука *Esox lucius* (щука обыкновенная).

Были определены коэффициенты биоконцентрации, сорбции и биоаккумуляции стойких органических загрязнителей, являющихся основными критериями, используемыми в мировой практике для оценки экологического риска загрязнения экотоксикантами водных экосистем.

Наибольшие средние значения коэффициента биоконцентрации на основе липидного веса и коэффициента биоаккумуляции получены для Σ ПХБ и составили 2 704 500 и 3500 соответственно. Диапазон средних значений рассчитанных коэффициентов биоконцентрации на основе влажного веса для исследуемых СОЗ составил от 2400 до 307 400. Наибольшее среднее значение коэффициента сорбции получено для ГХБ и составило 63 500.

Управлением по охране окружающей среды США (U.S. EPA) установлены следующие критерии идентификации биоаккумулирующихся веществ:

BCF W > 1000, вещество отвечает критерию биоаккумуляции;

BCF W > 5000, вещество отвечает критерию повышенной биоаккумуляции.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что уровни загрязнения СОЗ поверхностных вод и донных отложений дельты Селенги относительно невысоки.

2. Показано, что поступление стойких органических загрязнителей в экосистему дельты р. Селенги обусловлено локальными источниками (ПАУ, ПХБ), а также атмосферным переносом (хлорорганические пестициды, ПАУ).

3. Выявлено, что наибольшее токсическое воздействие на биоту исследуемых водоемов связано с ПАУ (залив Сор-Черкалов) и ХОП (дельта р. Селенги).

4. Впервые для Байкальской природной территории в качестве универсального биоиндикатора загрязнения водных экосистем стойкими органическими загрязнителями использована щука *Esox lucius* (щука обыкновенная) и определены коэффициенты биоконцентрации, сорбции и биоаккумуляции СОЗ.

5. Полученные данные указывают на чрезвычайно высокую биоаккумулятивную способность щуки *Esox lucius* по критериям, установленным управлением по охране окружающей среды США (U.S. EPA).

6. Доказана целесообразность используемых в настоящей работе подходов и методов. Из работы следует необходимость дальнейших мониторинговых исследований бассейна р. Селенги на территории России и Монголии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охрана и использование водных ресурсов Байкальского региона: учеб.-методическое пособие / В. С. Молотов, Е. Ж. Гармаев, О. П. Коломиец, А. В. Турунхаев. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2002. 96 с.
2. ATSDR. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons // Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Atlanta, GA: U. S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 1995.
3. Майстренко В. Н. Эколо-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М.: БИ-НОМ. Лаборатория знаний, 2004. 323 с.
4. Contaminant accumulation and biomarker responses in flounder (*Platichthys flesus* L.) and Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) exposed by caging to polluted sediments in Sorfjorden, Norway / J. Beyer, M. Sandvik, K. Hylland, E. Fjeld, E. Egaas, E. Aas, J. U. Skaare, A. Goksoyr // *Aquat. Toxicol.* 1996. Vol. 36. P. 75–98.
5. Янин Е. П. Техногенные илы в реках Московской области (геохимические особенности и экологическая оценка) / ИМГРЭ. М., 2004. 94 с.
6. Persaud D., Jaagumagi R., Hayton A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario // Water Resources Branch. Ontario Ministry of the Environment, Toronto, 1993. 27 p.
7. MacDonald D. D., Ingersoll C. D., Berger T. A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems // *Arch. of Env. Contamination and Toxicol.* 2000. Vol. 39. P. 20–31.
8. Distribution and fate of organochlorine pesticide residues in sediments from the selected rivers in Taiwan / R. A. Doong, Y. C. Sun, P. L. Liao, C. K. Peng, S. C. Wu // *Chemosphere.* 2002. Vol. 48. P. 237–246.
9. Distribution and sources of organochlorine pesticides in water and sediments from Daliao River estuary of Liaodong Bay, Bohai Sea (China) / L. Tan, M. He, B. Men, C. Lin // *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2009. Vol. 84. P. 119–127.
10. Evolution of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary / H. Budzinski, I. Jones, C. Pierard, P. Garrigues // *Marine Chemistry.* 1997. Vol. 58. P. 85–97.
11. Distribution of polycyclicaromatichydrocarbons (PAHs) in Henan Reachof the Yellow River, Middle China / J.-H. Sun, G.-L. Wang, Y. Chai, G. Zhang, J. Li, J. Feng // *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 2009. Vol. 72. P. 1614–1624.
12. Ivanov V., Sandell E. Characterization of polychlorinated biphenyl isomers in Sovol and Trichlorodiphenyl formulations by high-resolution gas chromatography with electron capture detection and high-resolution gas chromatography-mass-spectrometry techniques // *Environmental Sci. and Technol.* 1992. Vol. 26. P. 2012–2017.

G. S. Shirapova, S. V. Morozov, V. B. Batoev, M. I. Bogachev

ON THE MONITORING OF PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS IN THE RIVER DELTA ECOSYSTEM

*Held risk assessment of pollution of the delta of the Selenga River persistent organic pollutants (POPs), which carried out a comparative analysis of the content and spatial distribution of these pollutants in surface waters, sediments and liver of the fish (*Esox lucius*). As a result of established sources of pollutants in the ecosystem of the delta of the Selenga River and bioaccumulation of POPs fish.*

Ecological monitoring, persistent organic pollutants, ecosystem, river delta, river bed accumulations, bioaccumulation

УДК 616-71

A. П. Немирко, И. С. Саламонова

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ

Описаны способы измерения спирометрических параметров: комплайнса, резистанса и постоянной времени при искусственной вентиляции легких, выведенные на основе построенной электрической модели системы внешнего дыхания. Данные способы частично совпадают с используемыми в аппаратах искусственного дыхания.

Спирограмма, комплайнс, резистанс, постоянная времени

Данная статья является продолжением ранее опубликованной работы [1] и продолжает исследование применения электрической модели системы дыхания при искусственной вентиляции легких (ИВЛ). В работе [1] подробно описаны простая физическая модель дыхания и ее электрический аналог и рассмотрены процессы, происходящие в ее работе.