



## Глобальные проблемы химической безопасности

---

### Введение

---

Прежде всего необходимо отметить, что под *химической безопасностью* мы понимаем ситуацию, когда человек и биота не испытывают *химических стрессов*, то есть когда эффекты органических, неорганических и металлоорганических соединений находятся на экологически безопасном уровне (не приводят к возникновению болезней), что позволяет сохранять здоровье населения и биоразнообразие экосистем.

Эти негативные эффекты токсичности (человек) и экотоксичности (биота) многих химических соединений, загрязняющих воздух, воды, донные отложения, почвы, растения, животных и людей, были установлены безоговорочно и стали (по крайней мере, в некоторых развитых странах) важным моментом в национальных стратегиях безопасности. Например, Министерство окружающей среды Японии, обеспокоенное загрязнением окружающей среды, в течение последних более чем сорока лет проводило систематические исследования для определения истинного уровня загрязнения окружающей среды токсичными химикатами, в частности стойкими органическими загрязнителями (СОЗ).

Значительные усилия для предотвращения дальнейшего загрязнения окружающей среды стойкими токсичными веще-

**Петросян Валерий Самсонович** —  
председатель Секции химии РАЕН, эксперт ООН по проблемам химической безопасности, заслуженный профессор МГУ, академик

ствами (СТВ), включая СОЗ (а в последнее время и приоритетными токсичными металлоорганическими соединениями, в первую очередь, органическими производными ртути, олова и свинца), предпринимались последние более чем тридцать лет в странах Европейского Союза и Северной Америки (Канада и США).

Особое значение эта проблема приобрела с точки зрения здоровья населения. В частности, в США концепция болезни как свидетельства дисбаланса между окружающей средой и человеком привлекла пристальное внимание исследователей в 1990 г., когда Агентство токсичных веществ и регистра болезней обратилось в Национальный исследовательский совет Национальной академии наук с просьбой сформулировать эту проблему таким образом, чтобы она стала понятной ученым, чиновникам, законодателям и широким слоям населения.

Специальная рабочая группа в те годы обсуждала три главные проблемы, пытаясь ответить на следующие вопросы: как происходит воздействие на людей, как мы можем установить, что люди подверглись воздействию и что происходит после воздействия?

Кроме того предпринимаются международные усилия для прекращения загрязнения окружающей среды органическими и металлоорганическими соединениями, в частности, гидрофобными и летучими СОЗ, а также другими СТВ.

Стокгольмская конвенция (май 2001 г.) установила меры, которые позволят уменьшить (или ликвидировать) выбросы и сбросы 12 СОЗ:

1–8) *хлорорганические пестициды*: альдрин, гептахлор, ДДТ, дильдрин, мирекс, токсафен, хлордан, эндрин;

9–10) *промышленные продукты*: гексахлорбензол (ГХБ) и полихлорированные бифенилы (ПХБ);

11–12) *непреднамеренные продукты*: полихлорированные дибензодиоксины (ПХДД) и дибензофураны (ПХДФ);

1–5) *пестициды*: атразин, гексахлорциклогексаны (ГХЦГ), пентахлорфенол (ПХФ), хлордекон, эндосульфат;

6–14) *промышленные продукты*: гексабромбифенил (ГББ), короткоцепочечные хлорированные углеводороды (КЦХУ), нонил- и октилфенолы, оловоорганические и свинецорганические соединения, перфтороктансульфонат (ПФОС), полибромированные дифениловые эфиры (ПБДЭ), фталаты;

15–16) *непреднамеренные продукты*: производные метилртути и полиядерные ароматические углеводороды (ПАУ), прежде всего бенз (а) пирен (Б (а) П).

Основные проблемы с СОЗ и СТВ:

- 1) биоаккумуляция в пищевых цепях;
- 2) загрязнение питьевой воды;
- 3) негативный эффект, оказываемый на человека и биоту.

---

### ***Химические спутники Земли и глобальное загрязнение биосферы***

---

Согласно определению, предложенному нами в 2005 г., химические спутники земли — это химические соединения, попадающие в атмосферу из различных антропогенных источников и совершающие короткие и длинные (включая кругосветные) «путешествия», прежде чем встретят дождевые или снежные облака и выпадут в различных регионах нашей планеты.

Все три типа химикатов — органические, неорганические и металлооргани-

ческие — могут вести себя как химические спутники земли. Посмотрим, прежде всего, насколько велики выбросы тяжелых металлов в Европе (табл. 1).

Такие высокие уровни выбросов тяжелых металлов ведут к их значительным выпадениям и, как следствие, к высоким концентрациям свинца, кадмия и ртути в окружающей среде. Краткий анализ ситуации с этими тремя важными металлами приведен ниже:

*Свинец:* его самая высокая концентрация в атмосфере наблюдаются в Центральной и Восточной Европе (100 нг/м<sup>3</sup>); максимальный уровень в выпадениях может достигать 10 мкг/л.

*Кадмий:* его максимальный уровень наблюдается в атмосфере Польши, Чехии и Словакии (3 нг/м<sup>3</sup>); максимальная концентрация в выпадениях — 1,4 мкг/л.

*Ртуть:* ее максимальная концентрация в атмосфере и выпадениях (660 г/км<sup>2</sup>/год) наблюдается на востоке Германии, на юго-западе Польши, в центральных областях России и на востоке Украины.

Хорошо известен другой печальный пример — с радиоактивными элементами, которые появились в окружающей среде (сначала в атмосфере, а потом в почвах и водах) после взрыва на Чернобыльской атомной электростанции в Украине в апреле 1986 г. Первые дни после взрыва ветер нес выбрасываемые радиоактивные вещества в Скандинавские страны, где они и осаждались дождем. А через две недели ветер подул на восток и принес радионуклиды в восточные регионы Белоруссии и Украины, а также в восточные регионы России.

Мы показали (табл. 2), что эндемичная биота озера Байкал преимущественно загрязнена СОЗ и СТВ, приносимыми в озеро путем дальнего атмосферного переноса ПАУ и ПХБ, а также приносимыми путем дальнего водного переноса ДДТ и его метаболитами ДДД и ДДЭ.

Дальний атмосферный перенос СТВ может происходить следующим образом:

— в виде пара, поглощенного взвешенными частицами или растворенного в водном облаке атмосферы;

**Таблица 1.** Выбросы тяжелых металлов в Европе

Страна	Свинец	Кадмий	Ртуть
Великобритания	1033	13	12,4
Германия	632	11	31
Испания	944	14	18
Италия	2174	29,9	13,2
Польша	736	55,4	29,5
Россия	2262	49	9
Украина	3102	54	36
Франция	1190	14	36

**Таблица 2.** Содержание СТВ в пищевой цепи озера Байкал, нг/г

СТВ	ПАУ	ПХБ	ДДТ и его метаболиты
Фитопланктон	5030	но	но
Зоопланктон	7420	но	но
Голомянка	1018	1170	443
Омуль	86	38	но
Мальки нерпы	312	1710	2200
Самки нерпы	681	12810	7760
Самцы нерпы	1762	71074	80740

— растворенного в воде или поглощенного частицами донных отложений в воде;

— в тканях мигрирующих животных;

— антропогенным переносом в виде продуктов или отходов.

Ваня и МакКей (Канада) предположили, что химическое вещество после выпадения в конкретную фазу без разложения может снова попасть в атмосферу и претерпеть более короткий перенос, после чего оно может снова выпасть на Землю и это будет продолжаться достаточно долго — до тех пор, пока вещество не разложится («эффект кузнечика»).

Однако утверждается (Ивата и сотрудники, Япония), что на глобальном уровне температурные градиенты в космосе в комбинации с атмосферным перемешиванием способствуют постепенному переносу из теплых в холодные регионы. Это обуславливает повышенную концентрацию СТВ в полярных регионах и на больших высотах. Мы предложили называть данный эффект «полярной дистилляцией». Ваня и МакКей называют его «холодной конденсацией».

Что касается диоксинов, то было показано (Шаталов и сотрудники, Россия), что типичные уровни концентраций ПХДД и ПХДФ в атмосфере Средиземноморского региона — от 1 до 10 фг МЭТ/м<sup>3</sup> с максимальным значением в Италии (13 фг МЭТ/м<sup>3</sup>). Что касается типичных концентраций для водных экосистем, то они составляют от 2 до 20 пг МЭТ/л в Средиземном море с максимальными концентрациями у побережий Италии и Франции.

В табл. 3 приведены расчетные данные о выпадении некоторых СТВ в Европейские моря.

---

#### **Химические бумеранги и здоровье населения**

---

Согласно определению, предложенному нами в 2005 г., химические бумеранги представляют собой соединения, используемые людьми для решения жизненно важных проблем (например, для защиты растений — пестициды, в качестве теплообменников — ПХБ, как антивоспламенители — ГББ и ПБДЭ). Однако выполнив поставленную перед

**Таблица 3.** Выпадения некоторых СТВ в различные моря Европы

СТВ	Единицы	Средиземное море	Балтийское море	Северное море
ПХБ	кг/год	1623	715	594
Б [а] П	т/год	30	7	12
2, 3, 4, 7, 8-ПeXДФ	г МЭТ/год	492	65	101
Линдан	т/год	56	18	26

ними задачу (на первой половине петли бумеранга), они затем (на второй половине петли бумеранга) попадают в организмы людей и негативно влияют на их здоровье.

Основные источники поступления СОЗ и СТВ в окружающую среду:

1) производство (текстиль, хлорированные химикалии, нефтепродукты и катализаторы, бумага и картон);

2) термическое производство (металлургия, кокс, известь, керамика, кирпич и стекло);

3) сжигание (уголь, нефть, древесина, отходы, биомасса, ил, пластики);

4) применение продуктов (пестициды, красители, краски, отбеливающие агенты, ПХБ);

5) переработка (металлы, бумага, нефть, растворители);

6) размещение отходов (неиспользованные пестициды, зола).

Весьма сложной является, в частности, проблема неиспользуемых пестицидов в Центральной и Восточной Европе, а также в странах СНГ, ввиду того, что количество их оценено на уровне 150 тыс. т, в том числе: Азербайджан — 20 тыс. т, Белоруссия — 7 тыс. т, Болгария — 4 тыс. т, Литва — 4500 т, Молдова — 6500 т, Польша — 60 тыс. т, Россия — 20 тыс. т, Словения — 400 т, Украина — 15 тыс. т, Эстония — 8 тыс. т.

Выбросы ПХБ в атмосферу оценены на уровне 74 т, а выбросы ГХБ — на уровне 8200 т. Высокие уровни выпадения ПХБ из атмосферы характерны для Балтийского моря (10–15 нг/м<sup>2</sup>/день). Для Средиземноморского региона зафиксированы значения в интервале от 1,2 до 5,6 нг/м<sup>2</sup>/день.

Ввиду опасности ПХБ (канцерогены, эндокринные разрушители, предшественники диоксинов), утилизация масел с их добавками из трансформаторов и конденсаторов должна осуществляться с использованием современных экологически дружественных технологий, с предварительной промывкой и просушкой этих устройств, прежде чем их будут использовать снова.

Суммарные выбросы ПХДД и ПХДФ в атмосферу оценены на уровне выше 7 т с типичными концентрациями от 1 до 14 800 фгТЭ/м<sup>3</sup>. Выпадения на почвы в различных странах от 4 до 30 раз выше. Выпадения в водные экосистемы глобально оценены не были.

Выпадения ПАУ с очевидностью от 1 до 3 порядков величин выше, чем для других СОЗ и СТВ (со значениями, достигающими 5,2 мг/м<sup>2</sup>/день). Наиболее высокие значения в водах зафиксированы для прибрежных вод и эстуариев (до 8500 нг/л). В донных отложениях значения до 35,2 мкг/кг были зафиксированы

ны в южной части Балтийского моря. В восточной части Финского залива и северной части Ботнического залива обнаружены концентрации от 17,0 до 20,9 мкг/кг.

Оловоорганические соединения, главным образом, производные трибутил- и трифенилолова, преимущественно поступают в окружающую среду из антиобрастающих покрытий различных судов и подводных сооружений. Они используются также как катализаторы в некоторых химико-технологических процессах и стабилизаторы полиуретановых пен.  $(C_4H_9)_3SnX$  (ТБО) липофильны и биоаккумулируются в водных организмах. Устрицы, подверженные воздействию очень низких концентраций ТБО, указывают на значения фактора биоаккумуляции от 1000 до 6000. Показано, что малые дозы ТБО вызывают уродства у ракушек устриц и импосекс (превращение женских особей в мужские) у морских улиток. Большие дозы ТБО разрушают репродуктивную и центральную нервную системы, структуру костей и желчные протоки печени животных.

ПБДЭ используются начиная с 1960-х гг. главным образом в качестве антивоспламенителей полиуретановых пен в мебели, ковровых подстилках и матрацах. Они уже были найдены в высоких концентрациях в морских птицах и животных. Низшие конгенеры ПБДЭ (от тетра- до гекса-) проявляют свойства канцерогенов, эндокринных разрушителей и токсикантов, препятствующих развитию мозга.

Короткоцепочечные хлорированные углеводороды (КЦХУ) используются, в основном, как антивоспламенители в текстиле и резине, красках и жидкостях для работы с металлами. КЦХУ

легко биоаккумулируются в водных организмах. Показано, что они токсичны для рыб и других видов водной биоты.

Полифторированный октансульфонат (ПФОС) широко используется с 1948 г. для защиты тканей и бумаги и в качестве антивоспламенителя пен. Он устойчив в окружающей среде и биоцентрируется в рыбах и морских животных. Его период полураспада в людях в среднем 8,67 года. Были доказаны рост смертности от рака желчного пузыря и увеличение риска возникновения неоплазм мужской репродуктивной системы и желудочно-кишечного тракта.

По данным ЮНЕП, ежегодно в атмосферу выбрасывается около 1500 т ртути, главным образом, в результате сжигания угля на электростанциях и установках для сжигания отходов. Наибольшее количество ртути выбрасывают азиатские страны — около 850 т. На долю стран Африки приходится около 200 т, Европы — около 200 т, Северной Америки — около 120 т, Австралии и Океании — около 100 т и Южной Америки — 30 т.

На большей части европейской территории были показаны нижеследующие эффекты экотоксичности ртути: 1) уменьшение микробиологической активности в почвенных пищевых цепях вследствие ртутного загрязнения почв на уровне 0,07–0,3 мг/кг; 2) вредный эффект, оказываемый ртутью, на воспроизводство птиц наблюдался при концентрациях ртути в птичьих яйцах на уровне 0,07–0,3 мг/кг. Содержание ртути в Арктических окольцованных тюленях и белужьих китах за последние 25 лет увеличилось от 2 до 4 раз.

Эффекты токсичности ртути: производные метилртути разрушают центральную нервную систему, создавая,

в частности, выраженный риск для развивающегося зародыша, так как метилртуть легко преодолевает плацентарный барьер и разрушает развивающуюся нервную систему. Неорганические соединения ртути сильнее всего разрушают почки, но негативно влияют и на репродуктивную систему.

Предельно допустимые концентрации ртути в европейских морепродуктах — 0,5 мг/кг, но для большинства коммерческих морепродуктов: морской черт, угорь, щука, окунь, палтус, тунец, акула, осетр, меч-рыба, марлин, осетр и другие — 1,0 мг/кг. Ограничения Агентства по охране окружающей среды США весьма жесткие: нельзя потреблять морепродукты с концентрацией 1,0 мг/кг чаще, чем один раз в два месяца.

Завершая краткое рассмотрение концепции химических бумерангов, важно еще раз подчеркнуть негативный эффект, оказываемый СО<sub>2</sub> и СТВ на здоровье населения. К наиболее важным последствиям, обусловленным вышеуказанными токсикантами, относятся: канцерогенез, генотоксичность, разрушение эндокринной системы, иммунотоксичность, воспаление, некроз, нейротоксичность, дисфункция ферментов, цитотоксичность и гистопатология.

---

#### ***Парижская конвенция 1993 г. и проблемы химического оружия в Балтийском море***

---

Конвенция по химическому оружию ООН, предполагавшая уничтожение почти 100 тыс. т химического оружия, была подписана в 1993 г. более чем 150 странами и в 1997 г. вступила в силу.

Одним из важнейших аспектов данной конвенции была безопасность уни-

чтожения химического оружия (ХО). Поэтому в местах уничтожения ХО должно было быть обеспечено функционирование совершенных систем экологического мониторинга, которые могли бы быть использованы в режиме реального времени для мониторинга конкретных видов ХО, включая кожно-нарывные и нервно-паралитические газы в загрязненной окружающей среде.

С начала развития экологический мониторинг рассматривался просто как процесс наблюдения экологических параметров, повторяемых во времени и пространстве, в соответствии с программами, специально созданными для экологических исследований с использованием сравнимых методов и сбором данных. Потом под мониторингом стали понимать долговременные стандартизированные измерения, наблюдения, оценки и отчеты о состоянии окружающей среды с целью определения ее статуса и оценки тенденций в изменениях.

Долговременная практика осуществления мониторинга как жесткой системы постоянных пунктов наблюдения и частичного разделения систем мониторинга — от практических требований сбора информации до активности по управлению охраной природы — обусловила ситуацию, в которой в ряде случаев траты на реализацию мониторинга значительно превосходили эффект от использования полученных данных. Именно поэтому число пунктов постоянного наблюдения в последние годы систематически уменьшалось. В то же время появилась тенденция использовать вместо термина «мониторинг» термин «оценка». При этом оценка рассматривается как многоцелевой процесс



для определения физических, химических и биологических характеристик окружающей среды с точки зрения качества окружающей среды, воздействия на здоровье населения и использование природных ресурсов.

Одной из главных целей такой оценки стало определение долговременных трендов качества окружающей среды. В рамках проблемы управления качеством окружающей среды главная роль стала принадлежать системе мониторинга на локальном уровне, которая должна отвечать следующим требованиям:

1) получение сравнимой информации об объектах окружающей среды;

2) получение информации в реальной или квазиреальной шкале времени с целью оперативного действия, в том числе в чрезвычайных ситуациях (аварийное загрязнение и т.п.);

3) осуществление наблюдения, как на уровне базовой системы мониторинга, так и на уровне параметров, специфических для данного района;

4) использование унифицированных методологических принципов для обеспечения сопоставимости информации из нескольких источников;

5) получение обобщенной информации для создания банка данных.

Что касается непосредственно химического оружия, то следует указать, что ввиду хранения его в конкретных регионах, в частности, в Российской Федерации, наиболее важную роль должны играть региональные системы мониторинга и оценки, учитывающие специфические особенности этих мест.

В основе предложенной региональной системы лежат два аспекта экологического мониторинга боевых ОВ. Пер-

вый из них заключается в необходимости развития аналитических методов для определения малых и сверхмалых доз боевых ОВ, а также для исследования их воздействия на биоту, включая людей. Эта проблема разрабатывалась в последние 20 лет весьма интенсивно, и было получено много важных результатов, которые могут быть использованы в качестве базиса для развития данного аспекта мониторинга.

Вторым аспектом предложенной системы является необходимость использования аппаратуры для контроля качества окружающей среды и мониторинга продуктов деградации БОВ и их метаболитов в объектах окружающей среды и биологических системах. Большая часть веществ, используемых в качестве химического оружия, представляет собой лабильные соединения и существует в природных условиях очень короткие периоды времени, разлагаясь под влиянием факторов окружающей среды (например, солнечный свет и влага) и взаимодействуя с природными химическими веществами в почвах, воде и растениях. В некоторых случаях токсичность вторичных продуктов выше токсичности самих ОВ.

Ввиду сложности реакций, протекающих в объектах окружающей среды, и наличия смесей вторичных продуктов, проблему оценки качества окружающей среды невозможно решить только методами физико-химического и биологического мониторинга. Поэтому в центре разработанного подхода находится экспертно-аналитическая система, призванная решать задачу многофакторного анализа физико-химической, медико-биологической, генетической, технической, биологической, санитарно-гигиенической и социально-



экологической информации, выявлять взаимоотношение данных первичного мониторинга и факторы, обуславливающие объективную оценку экологической ситуации в районе производства, испытания, хранения и уничтожения химического оружия.

Важнейшей частью экспертно-аналитической системы является социально-экологический мониторинг, направленный на концептуальное решение исследовательских задач, разработку и реализацию рекомендаций в рамках социальных гарантий здоровья и безопасности населения, живущего в химически опасной зоне.

Анализ полученных данных осуществляется с использованием геоинформационных систем (ГИС), позволяющих хранить, обрабатывать, моделировать и визуализировать любую полученную информацию. Региональная система мониторинга для районов хранения и уничтожения ХО базируется на опыте индустриально развитых стран по созданию систем мониторинга для объектов с повышенной опасностью с точки зрения экологических ситуаций. Конвенция по уничтожению ХО требует определения с помощью идентичных аналитических методик и однозначной идентификации семи тысяч боевых ОВ, продуктов их разложения и родственных соединений.

Типичными образцами являются почва, вода, воздух, созданные человеком материалы (краски, бетон и т.п.), амуниция и ее компоненты. Воздействие окружающей среды (дождь, ветер, солнечный свет, тепло и т.д.) делают верификацию весьма сложной, так как в этих условиях уровни загрязнения боевыми ОВ могут быть чрезвычайно низкими,

и для идентификации этих веществ требуются в высшей степени совершенные приборы и методики.

Вот почему представляется очень серьезной и трудной для решения проблема 302 тыс. т химического оружия, захороненного после Второй мировой войны в Балтийском море около острова Борнхольм. Металлические емкости и снаряды, в которых захоронено ХО, вполне вероятно, со дня на день могут дать протечку, и ХО окажется в водах Балтийского моря.

В этой ситуации сложно ответить на вопросы: что произойдет, если протечка окажется интенсивной? будет ли в этих условиях достаточно времени для природного гидролиза этого ХО? Необходимо безотлагательно обсудить данную проблему и срочно привести в действие вышеописанную систему регионального мониторинга ХО.

---

#### **Как обеспечить химическую безопасность?**

---

ООН много лет назад создала Международный регистр токсичных химических веществ. В 2005 г. Европейский парламент утвердил специальную программу под названием «Регистрация и оценка химикатов» (REACH), в рамках которой до 2011 г. было потрачено 3,2 млрд евро на регистрацию и оценку приоритетных химикатов, продаваемых на европейском рынке. Проведенная оценка предполагала, что данная программа поможет в тот период сохранить 30 млрд евро за счет улучшения здоровья населения Европы. Однако после завершения программы был сделан вывод, что ее выполнение было

недостаточно успешным и что нужны дополнительные программы для решения глобальной проблемы химической безопасности.

Мы считаем, что если население Земли хочет выжить, необходимо на уровне ООН разработать *стратегию глобальной химической безопасности*, в основе которой должны лежать нижеследующие *пять принципов химической безопасности*.

1. Известные экспертам токсичные химические элементы и вещества не должны контактировать с людьми и биотой (животными и растениями).

2. Прежде чем какое бы то ни было новое химическое вещество будет предложено людям и начнет поступать в окружающую среду, следует провести многочисленные исследования, исключая возможность

токсического воздействия этого вещества (или его метаболитов) на человека и биоту.

3. Выбросы и сбросы всех химических веществ в окружающую среду и их попадание в атмосферу, воды и почвы должны быть максимально минимизированы;

4. Учитывая тяжелый опыт использования химического оружия, накопленный в ходе его применения в XX в. и сегодня, человечество обязано прекратить производство любых боевых отравляющих веществ.

5. На занятиях химией в школах, колледжах, университетах наряду с достижениями современной химии обязательно должен обсуждаться «бумеранговый» токсичный эффект использования химических веществ в нашей жизни.