

DIOXINES AND RELATED COMPOUNDS AS ECOTOXICANTS

H. C. BUDNIKOV

Some aspects of environmental pollution and distribution of polychloro-aromatic compounds are discussed at interdisciplinary level. Main attention is drawn to dioxines as superecotoxicants. Ecological analytical investigations are efficiently used for the evaluation of the environmental state and monitoring of these types of substances.

Обсуждаются эколого-химические аспекты распространения в окружающей среде ксенобиотиков, то есть чужеродных живому организму веществ класса полихлорированных соединений, содержащих ароматические ядра. Основное внимание уделено диоксинам и родственными соединениям как суперэкоотоксикантам. Отмечена роль аналитической химии в мониторинге этого типа веществ.

ДИОКСИНЫ И РОДСТВЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ КАК ЭКОТОКСИКАНТЫ

Г. К. БУДНИКОВ

Казанский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в результате хозяйственной деятельности человека в биосфере циркулирует большое число различных чужеродных для человека и животных соединений, или ксенобиотиков, многие из которых имеют исключительно высокую токсичность. Из органических соединений – загрязнителей выделены “приоритетные”, то есть те из них, которые представляют наибольшую опасность для человека сейчас и в будущем. Это прежде всего полихлорированные диоксины, дибензофураны и другие родственные хлорсодержащие органические соединения, в том числе и пестициды, применяемые для борьбы с вредителями сельского хозяйства. За высокую токсичность их относят к особому классу загрязняющих веществ – так называемым экоотоксикантам.

Эти соединения присутствуют в окружающей среде в ничтожно малых количествах, на уровне следов. Поэтому их определение в объектах окружающей среды, которые часто, как говорят, “представляют собой сложную матрицу” (имеют сложный химический состав), сродни поиску иголки в стоге сена и требует использования специальных аналитических методов и сложнейшего оборудования. Эти методы и приборы появились сравнительно недавно. Поэтому и возникла возможность проводить экологический мониторинг суперэкоотоксикантов достаточно успешно, хотя, как впоследствии было установлено, диоксины к тому времени существовали в природной среде уже несколько десятилетий, со времени начала производства хлорорганических соединений.

Диоксины и близкие им по структуре хлорорганические соединения обладают широким спектром биологического действия на человека и животных. В малых дозах они вызывают мутагенный эффект, отличаются кумулятивной способностью, ингибирующим и индуцирующим действием по отношению к некоторым ферментам живого организма. У человека и животных они могут вызывать повышенные аллергической чувствительности к различным ксенобиотикам. Их опасность очень велика даже в сравнении с тысячами других токсичных примесей. Комплексный характер действия этой группы соединений на человека и живые организмы приводит к подавлению иммунитета, поражению внутренних

органов и истощению организма. В природной среде эти суперэкоотоксиканты достаточно устойчивы и могут длительное время находиться в ней практически без изменений. Для них по существу отсутствует предел токсичности (явление так называемой сверхкумуляции), а понятие ПДК (предельной допустимой концентрации) теряет смысл. Организм человека подвержен действию диоксинов и родственных им веществ через воздух (аэрозоли) и воду, а также пищевые продукты. Важно отметить, что многие хлорорганические соединения, в том числе и диоксины, — достаточно устойчивые соединения и могут накапливаться в продуктах (особенно в жирах) по мере их переработки и не разрушаются при кулинарной (тепловой) обработке, сохраняя свое токсическое действие.

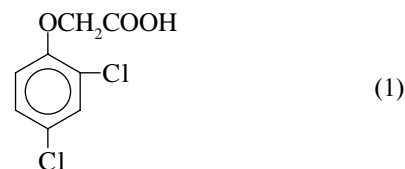
В связи с опасностью для здоровья человека и угрозой распространения диоксинов в природной среде в промышленно развитых странах созданы национальные программы и налажено международное сотрудничество по обмену информацией. С 1980 года ежегодно проводятся международные конференции по полихлорированным диоксином, дибензофуранам и родственными соединениям. Сейчас такая программа создана и в России, в том числе и в одной из республик Урало-Поволжского региона, Башкортостане, где она успешно выполняется под руководством профессора В.Н. Майстренко. Опасность общепланетарного отравления среды обитания диоксинами и родственными им соединениями осознана сейчас не только экологами, биологами и химиками, исследующими биосферу, но и правительствами разных стран. Эта проблема, включающая в себя многие аспекты охраны окружающей среды и ставшая междисциплинарной, является актуальной, и ее рассмотрение представляет интерес для широкой общественности.

КРАТКАЯ “ИСТОРИЯ И ГЕОГРАФИЯ” ДИОКСИНОВ И РОДСТВЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Проблема диоксинов привлекла внимание специалистов, занимающихся охраной окружающей среды, сравнительно недавно. Однако сейчас стало очевидно, что ее история насчитывает десятки лет. Уже в 30-х годах появились первые сведения о заболевании людей, вызванных воздействием сильных антисептиков — хлорфенолов. Тогда ошибочно полагали, что болезнь, названная хлоракне, происходит не от воздействия диоксинов, которые присутствовали как примеси в хлорфеноле, а от контакта с основным продуктом.

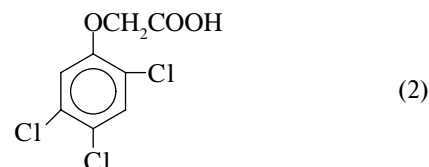
Во время войны во Вьетнаме (1962–1971 годы) американские войска, пытаясь подавить партизанское движение, широко использовали дефолиант (вызывающий ускоренное опадание листьев деревьев), называемый “agent orange” — “оранжевый реактив”. Всего над джунглями было распылено 57 тыс. т этого препарата, в котором, как оказалось,

в виде примеси содержалось около 170 кг диоксина. Сейчас этот дефолиант известен под названием 2,4-Д (2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота)



Он находит применение в сельском хозяйстве и в настоящее время, и поэтому выпуск препарата продолжается при тщательном контроле со стороны различных служб, призванных охранять среду обитания и здоровье человека.

Через несколько лет в г. Севезо (Италия) на заводе химических продуктов произошла катастрофа, в результате которой сотни тонн пестицида 2,4,5-трихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4,5-Т)



были распылены в окрестностях предприятия. Погибло много людей, а также сельскохозяйственных животных. В выбросе оказалось около 3–5 кг диоксинов как примесей в основном продукте, о чем тогда еще не было известно. Сейчас препарат 2,4,5-Т не производят.

После этих событий покров тайны с диоксинов был снят, а научное сообщество осознало важность проблемы, поскольку опасность распространения этого класса суперэкоотоксикантов стала очевидной. Появились сообщения о содержании диоксинов как примесей в различных препаратах (гербицидах, хлорфенолах), о накоплении их в водных экосистемах, миграции и т.д. Диоксины стали находить в выхлопных газах автомобилей (1980 год), продуктах сжигания мусора, в грудном молоке женщин (1984 год), в выбросах целлюлозно-бумажной промышленности (1985 год, США, Швеция). Проблема диоксинов приобрела глобальный характер. Хотя микропримеси диоксинов в промышленных продуктах никогда не являлись конечной целью человеческой деятельности, а большая часть из них попадала в среду обитания в результате побочных процессов (при синтезе, например, хлорорганических соединений, в том числе и пестицидов), однако их присутствие в настоящее время в окружающей среде не вызывает сомнений. Можно сказать, что диоксины и родственные им по структуре соединения непрерывно генерируются человеческой цивилизацией и поступают в биосферу. Появилось даже понятие “диоксиновый фон”. Уместно отметить, что ни в тканях эскимосов, замерзших 400 лет назад,

ни в тканях мумий индейцев, найденных на территории современного Чили, не удалось обнаружить диоксинов даже в следовых количествах.

Таким образом, сегодня существуют разнообразные источники поступления диоксинов и пути их проникновения в окружающую среду и организм человека. В основном этот вид суперэкоксикантов, как стало ясно, образуется в результате хозяйственной деятельности человека в промышленно развитых странах, особенно в городах, где сосредоточено большинство населения, и имеет, как правило, техногенное происхождение. Источники поступления диоксинов и родственных соединений в окружающую среду и организм человека и животных взаимосвязаны. На рис. 1 изображена схема этой взаимосвязи.

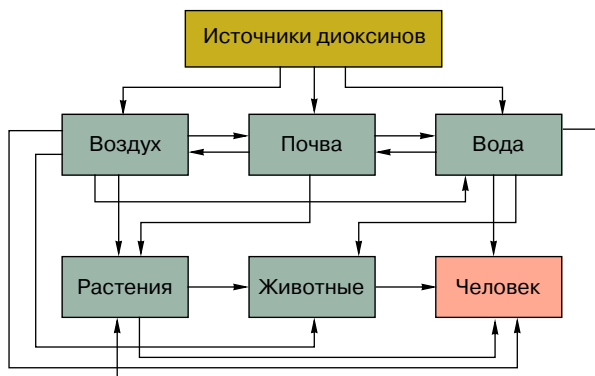
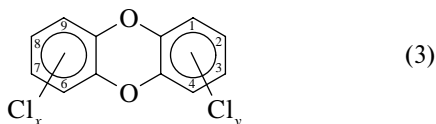


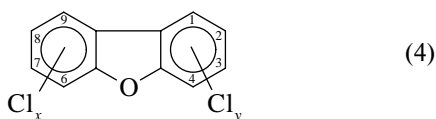
Рис. 1. Схема взаимосвязи источников диоксинов и среды обитания человека и животных

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИОКСИНОВ

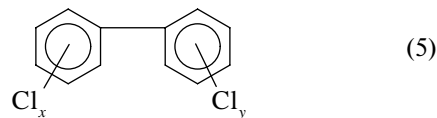
Дибензо-*n*-диоксины относятся к гетероциклическим полихлорированным соединениям, в структуре которых присутствуют два ароматических кольца, связанные между собой двумя кислородными мостиками



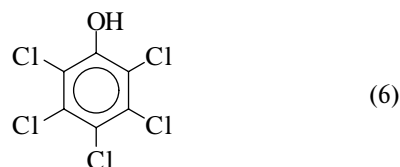
Аналогичные им дибензофураны содержат один атом кислорода



В родственных полихлорированных бифенилах два ароматических кольца связаны обычной химической связью



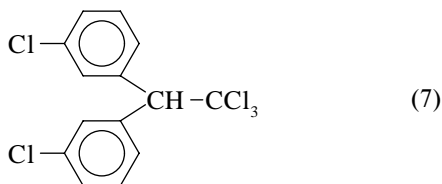
Соединения (3) и (4) представляют собой бесцветные кристаллические вещества, температура плавления которых зависит от числа атомов хлора в их структуре. Они хорошо растворимы в органических растворителях и практически нерастворимы в воде, причем с увеличением числа атомов хлора растворимость падает. Все соединения (3)–(5) характеризуются высокой химической устойчивостью, сохраняющейся даже при высокой температуре. В присутствии примесей кислот под влиянием света, например солнечного, соединения (3)–(5) сравнительно легко теряют атомы хлора и при этом становятся нетоксичными. При отсутствии органических растворителей этот процесс замедляется, однако при ультрафиолетовом облучении некоторых предшественников диоксинов, например пентахлорфенола,



наряду с дехлорированием может происходить образование высокотоксичного изомера диоксина.

Кроме высокой липофильности, то есть способности растворяться в некоторых органических растворителях и удерживаться в жироподобных матрицах, диоксины обладают высокой адгезией к частицам почвы, золы, донным отложениям, что способствует их накоплению и миграции в виде взвесей и комплексов с органическими веществами в поверхностных водах. Действительно, адгезия к частицам взвесей и микроорганизмам в водных системах приводит к тому, что общее содержание диоксинов в них может значительно возрасти по сравнению с содержанием в чистой воде. Диоксины как бы концентрируются на этих частицах, и при этом происходит их перераспределение: из водной фазы они переходят в фазу, состоящую из взвесей и микроорганизмов. Этому способствуют плохая растворимость диоксинов в чистой воде (на уровне 10^{-2} – 10^{-6} мг/л) и эффект высаливания, если в водах присутствуют посторонние неорганические соли. Это распределение характеризуется величиной соответствующих физико-химических констант — коэффициентом распределения. Например, коэффициенты распределения 2,3,7,8-тетрахлоризомера диоксина в системах почва–вода и биомасса–вода равны соответственно 23 000 и 11 000, что указывает на преобладание этого диоксида в фазе взвесей и биомассы, то есть микроорганизмов, остатков растений и т.д.

Токсическое действие соединений (3), (4) зависит от числа атомов хлора и их положения в структуре молекулы. Максимальной токсичностью обладает 2,3,7,8-тетрахлордibenзодидоксин (2,3,7,8-ТХДД). Кроме этого изомера высокую токсичность имеет и 1,2,3,7,8-пентахлордibenзодидоксин. Близки к ним в этом отношении и производные фуранового ряда, в частности 2,3,7,8-ТХДФ и его Cl₃-изомер. Эти соединения имеют токсичность на много порядков выше, чем, например, широко известный препарат ДДТ



ранее применяемый как высокоэффективное средство против насекомых и других вредителей сельского хозяйства, который также является хлорорганическим соединением. Некоторые из диоксинов близки к отравляющим веществам типа зарина, зомана, табуна. Однако исследования показали, что острая токсичность для теплокровных сейчас уже не может рассматриваться как критерий опасности этого типа ксенобиотиков. Попадая в организм человека и животных в основном через пищевые продукты, то есть по так называемым трофическим цепям, диоксины вызывают аномалии в работе генетического аппарата. Наиболее важными оказались первичные и вторичные эффекты влияния этого типа ксенобиотиков на организм и их последствия, существенно зависящие от среды обитания и условий существования организма. Так, первичные эффекты 2,3,7,8-ТХДД и его аналогов при воздействии на организм человека связывают с их высокой специфичностью к цитозольному Ah-рецептору, контролирующему в первую очередь активацию генов A1 и A2 на 15-й хромосоме человека, и накоплению неспецифических монооксидаз (ферментов), известных как P-4501A1 и P-4501A2. Комплекс 2,3,7,8-ТХДД с рецептором может принимать участие в подавлении гена на 16-й хромосоме человека, продуцирующего другой фермент — монодиоксиредуктазу. Диоксины проявляют высокое средство к тироксину рецептору в ядре клетки, что может вызывать его концентрирование в ядрах клеток, подверженных воздействию этих ксенобиотиков. Исследователи пришли к заключению, что действие диоксинов направлено на отобранные в ходе эволюции регуляторные механизмы живой клетки, запускаемые рецепторными белками с однотипным активным центром. Таким центром может служить гем, железосодержащее соединение из группы порфиринов, поскольку он по своим геометрическим и электронным параметрам способен связываться с планарными по структуре диоксином

ми. А порфирины, как известно, ответственны за перенос кислорода в живом организме.

Таким образом, попадая в организм, диоксины выступают как индукторы длительных ложных биологических ответов, способствуя накоплению ряда биокатализаторов — гемопротеидов в количествах, опасных для функционирования клетки и всего организма. В итоге затрагиваются регуляторные механизмы адаптации к внешней среде. Поэтому даже слабое поражение диоксином, проявляющееся в постоянной дискомфортности организма, высокой утомляемостью, пониженной физической и умственной работоспособности, а также в повышении чувствительности к биологическим инфекциям и другим химическим ксенобиотикам, может привести к драматическим последствиям в условиях дополнительных, обычно легко переносимых стрессов.

Вторичные эффекты диоксинов на организм связаны с индуцируемыми ими биокатализаторами — гемопротеинами, из которых изучены упомянутые выше цитохромы P-4501A1 и P-4501A2. Накопление последних опасно потому, что они в комплексах с диоксином включают механизм расходования энергетических ресурсов клетки на превращение O₂ в O₂[•], H₂O₂ и HO[•], что приводит к мутагенезу, биодеградации чувствительных к окислению гормонов, витаминов, липидов, разрушению биомембран и нарушению функций мембраносвязанных комплексов металлов (элементов жизни) с органическими лигандами, определяющих работу клетки. Особенно чувствительны к подобным негативным воздействиям иммунные клетки. Кроме того, эти же цитохромы участвуют в биотрансформации многих чужеродных организму веществ и нормальных метаболитов, превращая их в продукты гидроксилирования и эпоксилирования. Последние процессы приводят к повышению скорости биодеградации некоторых низкомолекулярных гормонов, нейромедиаторов, витаминов, ароматических аминокислот, лекарственных соединений, с одной стороны, а с другой — к биоактивации чужеродных веществ, из которых особенно опасными являются предшественники афлатоксина В₁, канцерогенов, нейротоксинов и сильных нервных ядов. Таков краткий и вместе с тем устрашающий перечень негативных изменений в работе клетки на молекулярном уровне, вызванных попаданием в организм диоксинов. В итоге вторичные эффекты диоксинов усугубляют первичные, что приводит к понижению иммунитета и в конечном счете вызывает так называемые экологические заболевания человека и животных. В настоящее время опасность диоксинов как канцерогенов считается доказанной, хотя в предшествующие два десятилетия полной ясности в этом вопросе не было. В этом и состоит главная причина токсичности диоксинов и их выделения в группу суперэкоксикантов. Следует отметить, что в описанных выше случаях поражения людей, которые

имели в прошлом контакты с различными хлорорганическими соединениями, были приписаны влиянию именно основных, то есть целевых, продуктов производства, а роль загрязнения диоксинами не могла быть учтена. Другие факты поражения относятся к авариям на химических предприятиях, производящих хлорорганические пестициды. При этом трудно или невозможно определить степень воздействия диоксинов как примесей на организм индивидуального человека, хотя их роль может быть весьма существенной.

Ориентировочная доза допустимого поступления диоксинов в организм человека в нашей стране составляет ~10 нг/кг (~10⁻⁸ г/кг). Эта величина имеет некоторый уровень запаса. Однако содержание диоксинов ниже этого значения еще не говорит о полностью благополучной ситуации. Поэтому необходимы как строгий контроль за уровнем поступления диоксинов в окружающую среду, так и мероприятия по предотвращению загрязнения.

Сейчас признано недопустимым присутствие диоксинов в продуктах питания, воздухе и питьевой воде. Достичь же этого практически невозможно. Поэтому различными службами контроля и охраны окружающей среды и здоровья человека в большинстве развитых стран установлены нормы допустимого поступления диоксинов в организм человека, а также ПДК или уровни их содержания в различных средах (воздухе, воде, почве и т.д.). На рис. 2 схематически изображены основные пути поступления диоксинов в трофическую цепь, заканчивающуюся человеком. Как уже было отмечено, полагают, что в основном диоксины поступают в организм человека с пищевыми продуктами, прежде всего с

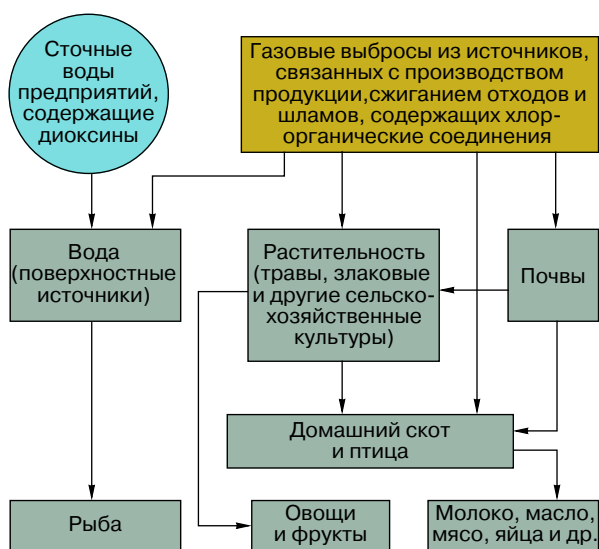


Рис. 2. Схема поступления диоксинов в организм человека по пищевой цепи

мясом и молоком. Из пищевых источников на первом месте стоят, видимо, животные жиры. Интересны данные, полученные в Германии и США. Подсчитано, что в среднем житель ФРГ ежедневно поглощает ~79 пг диоксинов, США – ~119 пг, Канады – ~92 пг (1 пикограмм равен 10⁻¹² г). Возможность такой оценки для России затруднительна. Предварительные расчеты суточного поступления диоксинов в организм жителей городов Уфы и Стерлитамака (Республика Башкортостан) с рекомендуемым набором мясных продуктов и молока показали, что только с этими продуктами питания люди потребляют более 100 пг диоксинов в сутки, что близко к соответствующим значениям других промышленно развитых регионов Европы.

К структурно родственным диоксинам соединениям, которые при некоторых условиях могут превращаться в диоксины, относятся и хлорорганические пестициды, в структуре молекул которых присутствуют ароматические ядра. Сейчас их применение под запретом. Однако сравнительно недавно они использовались в сельском хозяйстве весьма широко, что в свое время, казалось, дало большой положительный эффект. Затем оказалось, что хлорорганические пестициды крайне медленно разлагаются под влиянием физических, химических и микробиологических факторов, способны накапливаться в почве, растениях и т.д., передаваясь по пищевой цепи и концентрируясь в живых организмах. Например, период полураспада в почве большинства хлорорганических пестицидов превышает 1,5 года, а в случае ДДТ и дельдрин – 15–20 лет.

Как и многие другие хлорорганические соединения, хлорсодержащие пестициды гидрофобны и не могут проникать в растения через корневую систему, но зато хорошо поглощаются листьями из воздушной среды. Как и диоксины, этот тип токсикантов хорошо адсорбируется органическими компонентами почвы, донными отложениями и другими элементами водных экосистем и за счет этого способен перемещаться с поверхностными водами, распространяясь на большие расстояния и вызывая вторичные загрязнения.

При загрязнении почвы этими пестицидами подавляется биоактивность некоторых ферментов почв (дегидрогеназы, липазы, инвертазы), благотворно влияющих на здоровье почвы, уменьшаются скорость распада клетчатки и интенсивность почвенного дыхания. По этим показателям, кстати, можно сделать вывод о загрязнении почв промышленными выбросами на ранних стадиях. Со временем пестициды разлагаются под влиянием кислорода воздуха, солнечной радиации, воздействия воды, то есть при гидролизе, вызванном присутствием в почве соответствующих ферментов. Такое самоочищение почв от пестицидов происходит с различной скоростью в зависимости от дозы препарата, характера почвы и самого пестицида. Например, для ДДТ

этот срок составляет 4 года, для гексахлорциклопексана — 3 года, для дефолианта 2,4-Д — 1 месяц.

Для млекопитающих, как и для птиц, хлорорганические пестициды опасны тем, что влияют на репродуктивную функцию (особенно на стадии развития эмбрионов). При высокой устойчивости в окружающей среде и широком распространении действие этого типа пестицидов во многом аналогично влиянию диоксинов и дибензофуранов. Контакт с этими пестицидами может вызвать гибель животных или патологию внутренних органов. Поэтому гигиенические требования к охране окружающей среды привели в итоге к довольно жестким нормативам по содержанию пестицидов в природных объектах. Особенно строгие нормы существуют для пресноводных водоемов, ибо накопление пестицидов в рыбе является основным источником их проникновения в организм человека. Установлено, например, что при ежедневном употреблении в пищу 37 г полосатого окуня из реки Гудзон (США) заболеваемость раком печени возрастает до 38 случаев на 100 тыс. человек населения при статистической норме 1 случай на 1 млн человек. Кстати, именно рыбу предлагают считать хорошим индикатором, своего рода биологической мишенью для оценки степени загрязнения водных экосистем. Анализ содержания ДДТ в балтийской салаке показал, что хлорированные углеводороды прочно вошли в состав всех звеньев экосистемы Балтийского моря.

ИСТОЧНИКИ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Максимальный вклад в формирование упомянутого выше диоксинового фона вносят предприятия промышленного хлорорганического синтеза, а также переработка и применение этих продуктов. Особо опасными в этом отношении являются большинство процессов хлорирования органических соединений, прежде всего тех, которые содержат в своей химической структуре бензольные ядра, проводимые при высокой температуре, пиролитическая переработка и сжигание отходов этих производств, а также синтез и применение так называемых предшественников полихлорированных ароматических соединений, к которым относятся не только полихлорфенолы и полихлорпирокатехины, но и хлорсодержащие пестициды, например линдан. Все эти соединения могут превращаться в соединения (2)–(4) не только при пиролизе или сжигании отходов соответствующих производств, но и при метаболизме организмами в окружающей среде.

Уже на стадии получения свободного хлора при электролизе растворов неорганических хлоридов на графитовых электродах возможно образование некоторого количества диоксинов. Так, сравнительно недавно диоксины были обнаружены в шламах, содержащих отработанные графитовые электро-

ды, причем даже в шламах, складированных ранее 70-х годов (Швеция).

Заметный вклад в диоксиновый фон вносит целлюлозно-бумажное производство. На стадиях устранения лигнина, компонента древесины, в структуре которого присутствует бензольное ядро, и дальнейшего отбеливания хлором с целью получения белой бумаги возможно образование хлорированных фенолов — предшественников диоксинов. Так, в свое время диоксины были обнаружены в осадках целлюлозно-бумажного производства (США), а затем и в крабах, обитающих в акватории целлюлозно-бумажного комбината. Бумага, упаковка и изделия из нее являются еще одним источником диоксинов в быту, хотя и на чрезвычайно низком уровне их содержания ($\sim 10^{-12}$ г/кг). В принципе это может представлять опасность, поскольку кожные покровы человека эффективно извлекают диоксины из бумажных изделий (салфеток, детских пеленок, носовых платков и т.д.). Производители бумаги быстро откликнулись на требования экологической безопасности, и уже сейчас появились новые технологии изготовления бумаги, в том числе и высококачественной — отбеленной, не предусматривающие использование хлора. На изделиях из такой бумаги делается соответствующая пометка, например “chlorine free”.

Источником диоксинов могут быть и горящая свалка бытовых отходов, в которых присутствуют вышедшие из употребления изделия из полихлорвинила, а также лесные пожары (особенно после обработки лесных массивов хлорорганическими пестицидами) и даже небольшой костер, который часто можно наблюдать осенью или весной в коллективных садах или на приусадебных участках. Выводы, как говорится, здесь очевидны. Таким образом, для того чтобы уменьшить диоксиновую опасность, нужно не только совершенствовать технологию органических производств, но и решать проблемы уничтожения отходов, как бытовых, так и промышленных. И все это должно проводиться при строгом аналитическом контроле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с опасностью накопления диоксинов в организме детей через молоко и молочные продукты Всемирной организацией здравоохранения была разработана международная программа исследований по этой глобальной проблеме. С 1987 года международные научные группы работают в этом направлении. Сейчас мониторинг диоксинов осуществляется в США, Канаде, Японии, большинстве стран Западной Европы. В России также проводятся подобные работы. В настоящее время пять аккредитованных лабораторий мониторинга диоксинов имеют соответствующие разрешения на его проведение, а результаты их анализа являются официальным документом, характеризующим содержание этого класса суперэкоотоксикантов в объектах

окружающей среды со всеми вытекающими отсюда последствиями. Следует отметить, что осуществление подобного рода мониторинга требует больших финансовых затрат и усилий многих специалистов. Оборудование для этих целей также применяется достаточно сложное. Здесь используются так называемые тандем-приборы, сочетающие принципы методов газожидкостной хроматографии и масс-спектрометрии. Сначала диоксины извлекают из взятой пробы растворителями, затем после удаления растворителей компоненты пробы разделяют на составляющие на газожидкостном хроматографе и с использованием масс-спектрометра высокого разрешения определяют содержания разделенных диоксинов и сопутствующих им компонентов. Стоимость каждого такого определения достигает 1–3 тыс. долл. США. Конечно, при таких больших затратах массовый мониторинг диоксинов сейчас невозможен, и его проводят в основном в горячих точках – регионах, где назрела экологическая опасность и предполагается их присутствие. Как правило, это места производства и переработки хлорорганических продуктов и территории потенциально опасных химических и нефтехимических предприятий, о чем говорилось выше. Другие, более дешевые методы определения диоксинов не применяют из-за их неэффективности, хотя современная аналитическая химия располагает чувствительными методами и средствами определения веществ на уровне следовых концентраций. Уместно подчеркнуть не только чрезвычайно высокую роль химиче-

ского анализа в современном мире, но и ответственность аналитика за достоверность данных, по которым оценивают состояние природной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Л.А. Диоксины как экологическая опасность: Ретроспективы и перспективы. М.: Наука, 1993. 266 с.
2. Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К. Эколого-аналитический мониторинг суперэкоотоксикантов. М.: Химия, 1996. 320 с.
3. Коломиец А.Ф. Полихлорполициклические ксенобиотики // Успехи химии. 1991. № 3. С. 536–544.

* * *

Герман Константинович Будников, доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии Казанского государственного университета, член-корреспондент Академии естественных наук РФ, академик Международной академии высшей школы. Область научных интересов: электроаналитическая химия, химически модифицированные электроды, амперометрические биосенсоры для эколого-аналитического контроля. Автор более 550 публикаций, из которых 11 книг по проблемам электроаналитики и аналитической химии.