

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЛЕДОВЫХ КОЛИЧЕСТВ ВЕЩЕСТВ КАК ПРОБЛЕМА СОВРЕМЕННОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ

Г. К. БУДНИКОВ

Казанский государственный университет

## TRACE ANALYSIS AS THE PROBLEM OF MODERN ANALYTIC CHEMISTRY

H. S. BUDNIKOV

*The problem of finding and the quantitative determination of trace amounts of compounds is outlined. The role of non-chemical methods of analysis, basically physical methods, is emphasized.*

*Рассмотрены обнаружение и количественное определение следов веществ в различных объектах. Отмечена роль нехимических, прежде всего физических, методов анализа.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Основное внимание в курсе химии общеобразовательной школы уделяется свойствам и превращениям веществ и соединений неорганического и органического происхождения. При этом традиционно остаются практически без внимания такие крупные и важные разделы химической науки, как физическая и аналитическая химия и биохимия. И лишь только в последние годы в связи с общей тенденцией экологизации предметов естественнонаучного цикла, в том числе и курса химии в старших классах, и повышением роли экологического воспитания школьников постепенно вводятся разделы, в которых рассматривается превращение веществ, прежде всего ксенобиотиков, в природной среде, попавших туда в результате хозяйственной деятельности человека. При этом иногда кратко затрагивается проблема обнаружения этих чужеродных живому организму веществ, которые, как правило, в окружающей среде находятся в крайне низких концентрациях, как говорят в следовых количествах. Термин “trace analysis” переводят иногда как анализ следов, то есть буквально. Правильный перевод – определение следов (или следовых количеств), например: элементов, соединений, веществ, поскольку термин “анализ” относится к объекту, а не к отдельным его компонентам.

Проблема определения следовых количеств актуальна не только для анализа объектов окружающей среды. Существуют области науки и техники, в которых необходимость определения примесей на уровне следов элементов и соединений является важной задачей. Специалистам известно о влиянии таких примесей на широкий круг разнообразных физических свойств материалов и химических процессов, воздействию которых эти материалы подвергаются. Современная техника связана с использованием электрических, магнитных и оптических свойств сверхчистых материалов,

например при изготовлении полупроводников, волоконной оптики, сверхпроводников и ферромагнетиков. Следовые количества примесей зачастую определяют качество этих материалов. Незначительные изменения в составе примесей варьируют свойства базового полупроводникового материала до такой степени, что могут изменить тип его проводимости прямо на противоположный (*p*- и *n*-полупроводники). Следовые количества примесей влияют и на качество питьевой воды. Процессы жизнедеятельности живой клетки также обусловлены содержанием в ней микроэлементов, что предполагает необходимость контроля их перемещения в биосистемах, особенно от почв к растениям и животным и, следовательно, к человеку.

Определение следов — одно из средств криминалистической экспертизы. Поэтому методы и средства аналитической химии занимают видное место в криминалистике. Анализировать объекты приходится на содержание следов самых разнообразных веществ: наркотиков и их метаболитов, пороха и других взрывчатых веществ. Определение следов веществ играет важную роль в исследовании археологических и искусствоведческих объектов. Определение следов дает важную информацию о природе и происхождении материалов, позволяя установить подлинность предмета и его возраст, подтвердить гипотезы о глобальных климатических изменениях, происходивших в прошлом.

История развития аналитической химии следовых количеств компонентов неорганической природы охватывает значительный период. Этого нельзя сказать об определении, как иногда говорят, минорных количеств органического происхождения. Даже само выражение “следовые количества” в большинстве случаев связывается с неорганическим анализом. Именно успехи в области изучения распространения галогенсодержащих пестицидов и других органических веществ в глобальном масштабе, установление источников их попадания в окружающую среду, появление новых пестицидов, легко разрушающихся в ней, — все это стало возможным благодаря развитию новых чувствительных методов определения этого класса соединений.

Можно проследить многогранные связи между аналитической химией следовых количеств органических веществ и другими областями науки, а также политикой, социологией, экономикой, медициной. Однако, по-видимому, экологические проблемы и охрана здоровья человека могут стать движущей силой развития и дальнейшего совершенствования методов определения следовых количеств органических соединений.

Само понятие “следы” может меняться в зависимости от решаемой задачи, поэтому не существует общепринятого мнения относительно уровня concentra-

ции, при котором для его характеристики применяют термин “следовые количества”. Так, два-три десятилетия назад следовыми количествами считали содержание компонента в смеси на уровне 0,01%. Учитывая всевозрастающий интерес к определению содержаний на уровне  $10^{-7}$  % и ниже, стали пользоваться также термином “ультраследы” для концентраций ниже  $10^{-4}$  %. Четкое разделение этих понятий, конечно, излишне, так как оно зависит от определяемого компонента, метода анализа и аналитика, проводящего анализ. Диапазон концентраций следов веществ в различных объемах охватывает несколько порядков величин от микрограммов ( $10^{-6}$ ) до аттограммов ( $10^{-18}$ ) в единице массы или объема.

### ЧТО ТАКОЕ ПРЕДЕЛ ОБНАРУЖЕНИЯ

Все аналитические методы основаны на получении и измерении аналитического сигнала, то есть любого проявления химических и физических свойств вещества, фиксируемых прибором, которое можно использовать для его обнаружения или количественного определения. Этот сигнал функционально зависит от концентрации определяемого компонента.

Аналитический сигнал по своей природе специфичен, то есть присущ только вполне определенным атомам, молекулам или другим частицам. На практике же аналитические сигналы различных веществ часто бывают настолько близки, что измеряющая аппаратура не в состоянии их различить. Кроме того, на аналитический сигнал могут накладываться сигналы от растворителя, примесей в нем, реагентов, других близких по свойствам частиц, а также шумы, возникающие в измерительной аппаратуре. Обычно посторонние сигналы и шумы учитывают при проведении контрольного опыта, в котором изучаемая проба не содержит определяемого компонента. В этом случае сигнал, измеряемый аппаратурой с поправкой на сигнал контрольного опыта, будет называться полезным сигналом. Разработчики аналитической аппаратуры и конкретного метода определения стремятся максимально уменьшить сигнал фона и, главное, его колебания. Аналитическое приборостроение последнего десятилетия демонстрирует порой выдающиеся успехи в решении этой проблемы.

Если аналитический метод позволяет обнаружить разницу между весьма малыми количествами компонента, то говорят, что он обладает высокой чувствительностью. Иногда это понятие применяют к малым количествам вещества или концентрациям, которые вообще могут быть обнаружены в какой-либо пробе или матрице. В этом случае применяют термин “предел обнаружения” (PrO), который характеризуется разностью между полезным сигналом определяемого

компонента и сигналом контрольной пробы (или фона). Чаще всего полезный сигнал линейно связан с количеством определяемого компонента или его концентрацией  $C_x$ :

$$y = ac + b, \quad (1)$$

где  $y$  – интенсивность аналитического сигнала;  $a$  – коэффициент чувствительности, отражающий восприимчивость аналитического сигнала к изменению концентрации;  $b$  – значение сигнала при отсутствии определяемого компонента, то есть в контрольной пробе.

На рис. 1 приведен график зависимости  $y$  от  $C_x$ , по которому можно оценить параметры  $a$  и  $b$  и который называется градуировочным. Этот же график используют и для оценки ПрО, вводя при этом понятие  $C_n$  и понимая под этим обозначением наименьшую концентрацию, которую можно обнаружить с некоторой доверительной вероятностью  $P$ :

$$C_{n,P} = \frac{y_{\text{lim}} - \bar{y}_B}{S}, \quad (2)$$

где  $y_{\text{lim}}$  – предельно малое значение аналитического сигнала, которое еще можно измерить на приборе;  $\bar{y}_B$  – среднее значение этого параметра в контрольной пробе (фоне);  $S$  – коэффициент чувствительности, аналогичный  $a$  в уравнении (1).

Для оценки  $y_{\text{lim}}$  используют статистические критерии:  $K$  – коэффициент, характеризующий доверительную вероятность, и  $S_B$  – стандартное отклонение в контрольном опыте:

$$y_{\text{lim}} = \bar{y}_B + KS_B. \quad (3)$$

Коэффициент  $K$  может принимать значения 2, 3, 10 и выше (обычно 3). Чем больше  $K$ , тем надежнее обнаружение аналитического сигнала, а отсюда и определяемого компонента. Рис. 2 иллюстрирует эти рассужде-

ния. В итоге для оценки ПрО нужно найти стандартное отклонение в контрольном опыте (лучше всего провести не менее 20 повторных, так называемых параллельных измерений) и коэффициент чувствительности измерения:

$$C_{n,P} = \frac{KS_B}{S}. \quad (4)$$

Существуют стандартные программы для различных типов персональных компьютеров и даже для программируемых микрокалькуляторов, позволяющие достаточно просто оценивать  $C_{n,P}$ . Отметим, что величина ПрО определяется не средним уровнем фонового сигнала, а размахом колебаний последнего относительно некоторого фонового уровня, то есть величиной  $S_B$ .

Если отношение  $\bar{y}_B/S_B = \text{const}$ , то ПрО можно оценить по отношению величины полезного сигнала к сигналу в контрольном опыте или фоне (в научной литературе это соотношение обозначают как  $S/N$ , где  $S$  и  $N$  – начальные буквы английских слов signal и noise – сигнал и шум). Величины ПрО можно выразить двумя способами: как абсолютный предел обнаружения – минимально определяемое количество вещества, выраженное в микрограммах ( $10^{-6}$  г) и т.д., и как относительный предел обнаружения – минимальная обнаруживаемая концентрация, выраженная в процентах, частях на миллион (ppm – parts per million), миллиард (ppb – parts per billion), в молях на литр и т.д. В практике количественного анализа обычно используют понятие диапазона определяемых содержаний. Как правило, аналитика больше всего интересует нижняя граница определяемых содержаний  $C_n$  – наименьшее содержание компонента, определяемое по данной методике в конкретном объекте. Существуют несколько способов установления  $C_n$ . Чаще всего за эту величину принимают то минимальное количество или концентрацию,

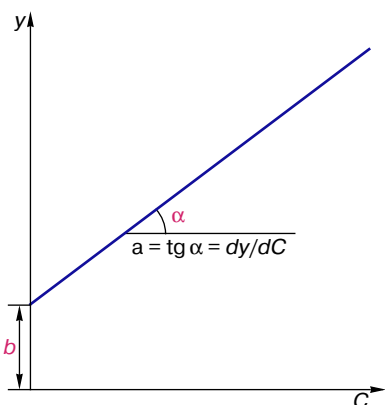


Рис. 1. Типичный градуировочный график

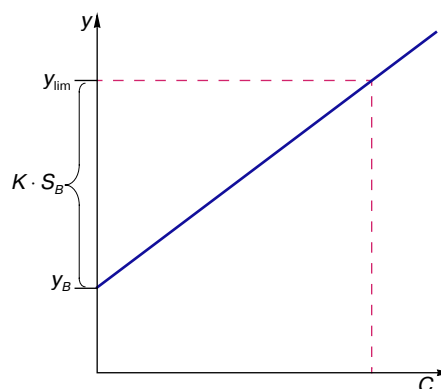
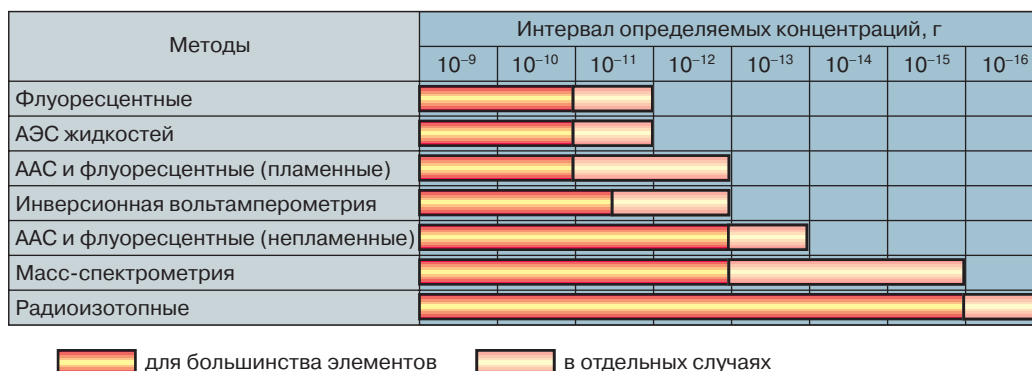


Рис. 2. К расчету предела обнаружения



**Рис. 3.** Абсолютный предел обнаружения элементов некоторыми методами

которые соответствуют значению  $S_r \leq 0,33$ , где  $S_r$  – относительное стандартное отклонение, то есть  $S/\bar{y}$ , в серии измерений. Величина  $C_{\text{н}}$  может в 10–20 раз превышать ПрО.

### ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЛЕДОВ ВЕЩЕСТВ

Физический эффект, измеряемый с целью обнаружения или количественного определения компонента, вызванный энергетическим воздействием на него, является аналитическим сигналом. В результате нескольких или многих измерений сигнала и их усреднения получают аналитический сигнал, который должен быть функционально связан с содержанием определяемого компонента.

Когда возникла задача определять примеси в металлах и других материалах на уровне 10<sup>-4</sup> %, а для некоторых примесей, например бора, гадолиния, кадмия в уране и других ядерных материалах, и того меньше, на уровне 10<sup>-5</sup>–10<sup>-6</sup> %, стало очевидно, что традиционные химические методы анализа здесь неэффективны. Еще более высокие требования возникли в период развития полупроводниковой техники. Так, для полупроводниковых материалов, например германия и кремния, недопустимы примеси меди или никеля на уровне 10<sup>-7</sup>–10<sup>-8</sup> %. Другими словами, возникла необходимость определять один атом элемента – примеси на 10 млрд атомов германия или кремния.

Именно разработка и применение физических методов анализа позволили снизить ПрО элементов в 100–1000 раз и более. Из физических методов, особенно при анализе объектов неорганической природы, распространение получили спектроскопические методы, из которых атомно-эмиссионный анализ (АЭА) и атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) занимают наиболее видное место. В случае АЭА атомы возбуждаются, например, искровым разрядом или дугой

электрического тока и испускают световую энергию. Каждый элемент характеризуется своим набором спектральных линий, поэтому элементы легко отличить друг от друга. Интенсивность такого излучения определяется его концентрацией в образце. Этот метод позволяет проводить и количественные определения и устанавливать природу элемента, то есть идентифицировать его. Сущность метода ААС состоит в измерении поглощения света свободными атомами элементов. В специальном устройстве (атомизаторе) молекулы веществ разлагаются на отдельные атомы (для этого применяют графитовую печь, пламя). Последние избирательно поглощают свет определенной длины волны, поэтому, измеряя поглощение света атомами, находящимися, например, в пламени с распыленной в нем пробой, можно судить о наличии и количестве (концентрации) в ней того или иного элемента.

Из других методов, с помощью которых можно определять следовые количества примесей, следует отметить группу разнообразных масс-спектрометрических методов. Они основаны на различимом отклонении в магнитном поле веществ, отличающихся по массе и заряду ионов. Ионизация исходной пробы осуществляется, например, путем воздействия потока электронов на образец, так называемого электронного удара. Эти методы широко применяют для определения примесей как в чистых неорганических веществах, так и в анализе различных органических соединений.

Для устранения или уменьшения погрешностей при измерении аналитического сигнала и снижения ПрО большое значение имеют способы выделения этого сигнала (например, нужной спектральной линии) из шумов, то есть уменьшения величины  $\bar{y}_B$  или  $S_B$  (уравнения (3), (4)).

В современной аппаратуре это снижение или устранение помех осуществляется при помощи средств микроэлектроники и микропроцессорной техники,

Фоновые шумы учитываются с помощью компьютера, способного запоминать и хранить сведения о влиянии помех и автоматически вводить соответствующую поправку в аналитический сигнал. На рис. 3 в качестве примера даны абсолютные величины ПрО, достигнутые различными методами. Если какой-либо метод требует перевода пробы в раствор, то, как отмечалось выше, величины ПрО выражают в мкг/мл или мкМ/мл.

К весьма высокочувствительным методам анализа относятся и радиохимические методы. Они основаны на явлении радиоактивности. В специальном реакторе вещество облучают нейтронами, гамма-квантами или же заряженными частицами. При взаимодействии такого рода излучения с ядрами атомов элементов в веществе происходят ядерные реакции. При этом образуются, как правило, радиоактивные элементы или изотопы, а количество определяемого элемента в веществе устанавливается по величине индуцированной радиоактивности. Радиохимические методы обладают исключительно низким ПрО и поэтому позволяют определять ничтожные примеси элементов в чистых веществах, в водах различного происхождения, геологических образцах и других объектах вплоть до концентраций  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  %.

В анализе неорганических материалов применяют и рентгеновские методы, один из которых основан на облучении вещества рентгеновскими лучами и измерении энергии и интенсивности вторичного, то есть иницированного этим воздействием, рентгеновского излучения. Это метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Метод РФА имеет ПрО на уровне  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  г, он незаменим при анализе полупроводниковых материалов и готовых изделий из них, например подложек микросхем и т.п.

Физические методы определения следовых примесей обладают поистине фантастическими возможностями. Даже в чистых и ультрачистых веществах имеются шансы уловить присутствие следов наиболее распространенных в земной коре элементов: кремния, алюминия, железа, кальция, магния, натрия, калия и кислорода. Само понятие чистого или ультрачистого вещества становится неопределенным. Поэтому несколько странно звучит вывод: абсолютно чистых индивидуальных веществ в природе нет.

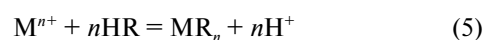
### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СЛЕДОВЫХ КОЛИЧЕСТВ ЭЛЕМЕНТОВ

Как уже отмечалось выше, следы элементов определяют, как правило, в присутствии матрицы, то есть основных компонентов образца. Матрица может иметь неорганическую (металлы, сплавы, керамика, геологические образцы, воды) и органическую (нефть и нефтепродукты,

полимеры, биологические материалы) природу. Если компоненты и их сочетание в матрице не оказывают влияния на определение следов элементов, а концентрация их достаточно высокая, то возможно прямое определение этих следов с помощью высокочувствительных инструментальных методов. Однако этот подход встречает трудности, если аналитический сигнал от основных компонентов матрицы “забивает” сигнал определяемого элемента.

Поэтому прибегают к другому пути – отделяют следы элементов от матрицы. Такое разделение одновременно может означать и предварительное концентрирование. Существуют несколько приемов концентрирования следовых примесей, из которых наиболее эффективным является экстракция. Жидкостная экстракция органических соединений уже была рассмотрена в статье Я.И. Коренмана “Экстракция органических соединений” (Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1. С. 40–44). По экстракционным методам разделения и концентрирования элементов имеется богатая научная литература. Существенный вклад в развитие методов разделения и концентрирования элементов с помощью жидкостной экстракции внесли российские химики-аналитики.

Жидкостная экстракция основана на распределении растворимого вещества между двумя несмешивающимися жидкими фазами. Наибольшее распространение имеют системы, в которых одна фаза является водной, а вторая – какой-либо органический растворитель или даже смесь органических растворителей. Обычно определяемый элемент (ион металла  $M^{n+}$ ) извлекают из водной фазы в виде комплекса с каким-либо органическим реагентом (RH). При этом протекают химические процессы, из которых определяющий состоит в реакции иона  $M^{n+}$  с реагентом RH:



с константой устойчивости образующегося комплекса

$$\beta = \frac{[MR_n]}{[M^{n+}][HR]^n}, \quad (6)$$

который и экстрагируется органическим растворителем, распределяясь между двумя фазами:

$$MR_{n(H_2O)} = MR_{n(орг)}, \quad K = \frac{[MR_n]_{орг}}{[MR_n]_{H_2O}}, \quad (7)$$

где величина  $K$  называется константой распределения.

В большинстве экстракционных систем в органическую фазу при определенных условиях переходят некоторые металлы. Подбором экстракционного реагента RH, pH среды и других условий добиваются достаточно высоких значений  $K$ , а отсюда и избирательного

извлечения ионов  $M^{n+}$ . После концентрирования следов элементов их экстракт анализируют каким-либо из рассмотренных выше методов.

При определении следов элементов кроме жидкостной экстракции используют операции разделения и концентрирования элементов и веществ на так называемых ионообменных колонках. В общем случае операция такого концентрирования состоит из двух стадий: сорбции следового компонента (то есть его концентрирования), промывки колонки и элюирования (вымывания) определяемого компонента (например, иона металла) с использованием соответствующего реагента (элюента). На практике для осуществления этого процесса прежде всего требуется подобрать колонки с ионообменником, который более или менее селективно извлекал бы из раствора определяемую примесь, а затем — подходящий элюент для селективного же вымывания. Зависимость, отражающая распределение концентрации следовой примеси как функцию времени, напоминает кривую нормального распределения Гаусса с четко выраженным пиком, являющимся аналитическим сигналом, причем положение пика на оси времени связано с природой элемента или соединения, то есть является его качественной характеристикой в конкретных экспериментальных условиях, а высота пика — количественной характеристикой, так как она зависит от количества (концентрации) определяемого соединения в пробе. Используя этот аналитический принцип современные ионные хроматографы являются высокоэффективными аналитическими приборами, позволяющими осуществлять разделение сложных смесей и одновременно определять различные ионы на уровне следовых количеств. Без этих приборов невозможно представить современную лабораторию, которая занимается, например, контролем качества воды — питьевой или технической, используемой в замкнутых системах ТЭЦ, определением остаточных количеств удобрений в пищевых продуктах, например нитратов в овощах, фруктах.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЛЕДОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Выше отмечалось важное значение задачи определения следов органических веществ в различных объектах. Новые проблемы возникли перед этой областью аналитической химии не только в связи с возрастающим вниманием к контролю состояния окружающей среды. Помощь государства в охране здоровья населения напрямую зависит от уровня развития клинического, фармацевтического и токсикологического анализа, а также анализа пищевого сырья и пищевых продуктов. А это, в свою очередь, уже задача следового органичес-

кого анализа. Перечень органических токсикантов воздушного бассейна может достигать нескольких тысяч, и это только так называемые приоритетные загрязнители. В поверхностных водах могут находиться следы не только пестицидов, но и фенолов, нефтепродуктов, детергентов и т.д. В клиническом анализе внимание исследователей привлекают задачи определения содержания гормонов, биогенных аминов, аминокислот и транквилизаторов. В токсикологическом анализе определяют различные яды, токсиканты, природные соединения, наркотики и другие вещества. В организме человека и животных эти соединения претерпевают метаболизм, продукты которого также являются предметом внимания исследователей. И все эти компоненты присутствуют в следовых количествах. При этом матрица может иметь органическую природу (растения, мясо, ткани, молоко, пищевые продукты, кровь, экскременты, промышленные органические продукты, например полимеры) или неорганическую (вода, воздух, минералы).

При определении следов органических веществ применяют часто те же методы и приемы, что и в случае неорганических примесей. Предварительное разделение следовых компонентов или их отделение от матрицы, а также концентрирование следов с помощью экстракции, электрофореза, различных вариантов хроматографии порой являются необходимой стадией анализа. Не всегда исследуемое соединение можно обнаружить с помощью аппаратуры. В этих случаях его подвергают так называемой дериватизации, то есть переводу в иное соединение, обладающее уже другими аналитическими характеристиками, например окраской, применяя специальные реагенты. Подлинную революцию в определении малых количеств органического вещества совершила газожидкостная хроматография. В этом варианте хроматографии поток газа-носителя, содержащий определяемые компоненты, попадая в колонку с сорбентом, разделяется на зоны, которые и детектирует специальное устройство. Некоторые типы детекторов (например, детектор, основанный на электронном захвате) позволяют обнаруживать пикограммовые количества вещества. Если в качестве детектора используется масс-спектрометр, то такой тандем (хроматограф — масс-спектрометр, или хроммас) дает возможность определять следы органического вещества на уровне фемтограммов.

Однако высшие достижения в величинах ПрО, пожалуй, относятся к методам флуоресценции и зонного капиллярного электрофореза (ЗКЭФ). Эти методы позволяют фиксировать количества на уровне аттограммов. В методе флуоресценции исследуемое соединение облучают светом определенной длины волны  $\lambda$ , причем это облучение сопровождается вторичной эмиссией излучения молекулами вещества при длине волны  $\lambda$

или отличающейся от нее. Метод чувствителен к тем химическим структурам, которые содержат системы сопряженных связей, ароматические кольца и т.п.

В методе ЗКЭФ разделение заряженных частиц или молекул осуществляют в тонком капилляре, на концы которого наложено высокое напряжение. В электрическом поле благодаря различию в подвижности частиц и молекул происходит разделение. На конце капилляра, из которого разделенные частицы или молекулы выходят по зонам, находится детектор, который и фиксирует момент выхода этой зоны из капилляра, подобно детектору в методе жидкостной хроматографии.

Кроме этих методов используют и другие, например тонкослойную хроматографию, где разделение смеси веществ и обнаружение следов происходят на сорбенте, нанесенном тонким слоем на пластинку, по которой и перемещается подвижная фаза, вызывающая разделение. Метод прост, экспрессен, характеризуется низким ПрО (до 0,005 мкг).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи определения следов вещества можно рассматривать как доказательство важной роли аналитической химии в современном обществе. Сейчас говорят, что аналитическая химия — ключ к безопасному будущему человечества. Уместно отметить, что пятая часть химиков всего мира, включая Россию, считают себя аналитиками. Большинство из них занимаются проблемами определения следовых примесей в различных объектах. Аналитик получает первичную информацию, на основе которой могут приниматься критические решения, например при оценке степени риска при антропогенном воздействии на среду обитания, вынесении вердикта о качестве пищевых продуктов, состоянии здоровья человека.

Жизнь постоянно ставит перед аналитиками новые проблемы, связанные с необходимостью обнаружения

и определения веществ на уровне следов и ультраследов. Так, недавно была поставлена задача обнаружения одной молекулы в жидкостях, которую оценили как вызов современному химику-аналитику. В первых работах в этом интереснейшем направлении исследований использованы методы флуоресценции, а объем раствора достигал ~1 фемтолитра ( $10^{-15}$ ). Есть уверенность, что эта задача будет решена в ближайшее время, а это, в свою очередь, означает крупный прорыв в определении фрагментов ДНК, мониторинге грунтовых и подземных вод, иммунном анализе, фундаментальных исследованиях физических и химических явлений на уровне одной молекулы.

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Физические методы анализа следов элементов / Под ред. И.П. Алимарина. М.: Мир, 1967. 355 с.
2. Золотов Ю.А. Аналитическая химия: Проблемы и достижения. М.: Наука, 1992. 285 с.
3. Байерман К. Определение следовых количеств органических веществ. М.: Мир, 1987. 462 с.
4. Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К. Эколого-аналитический мониторинг суперэкоксикантов. М.: Химия, 1986. 319 с.

*Рецензент статьи* Г.В. Лисичкин

\* \* \*

Герман Константинович Будников, доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии Казанского государственного университета, член-корреспондент Академии естественных наук РФ и Российской экологической академии, академик Международной академии наук высшей школы. Область научных интересов — электроаналитическая химия, химически модифицированные электроды, биосенсоры для эколого-аналитического контроля. Автор более 550 публикаций, из которых 12 книг по проблемам электроаналитики и аналитической химии.