



**Кафедра биологии растений и химии**

# **ХИМИЯ**

**Теоретический раздел  
Лекция**

**Физико-химические методы анализа**

## 1. Общая характеристика физико-химических методов исследований

Физико-химические и физические методы составляют группу инструментальных методов анализа. Физико-химические методы анализа (ФХМА), как и химические методы, основаны на проведении той или иной химической реакции. В физических методах химические реакции отсутствуют или имеют второстепенное значение, хотя в спектральном анализе интенсивность линий всегда существенно зависит от химических реакций в угольном электроде или в газовом пламени. Поэтому иногда физические методы включают в группу физико-химических методов, так как достаточно строгого однозначного различия между физическими и физико-химическими методами нет и выделение физических методов в отдельную группу не имеет принципиального значения.

Химические методы анализа были не в состоянии удовлетворить многообразные запросы практики, возросшие в результате научно-технического прогресса, развития полупроводниковой промышленности, электроники, широкого применения чистых и сверхчистых веществ в технике. Применение физико-химических методов анализа нашло свое отражение в медико-биологических и фармацевтических исследованиях, где также требуется определение более низкого содержания компонентов в биологических жидкостях и тканях, фармацевтических препаратах, в воздушной и водной средах.

Физико-химические методы анализа основаны на том, что анализируемый объект подвергают химическим превращениям, при этом измеряют физико-химические свойства вещества (аналитический сигнал), которые регистрируются приборами. Аналитический сигнал зависит от природы и концентрации определяемого вещества.

Точность физико-химических методов сильно колеблется в зависимости от метода. Наиболее высокой точностью (до 0,001 %) обладает *кулонометрия*, основанная на измерении количества электричества, которое затрачивается на электрохимическое окисление или восстановление определяемых ионов или элементов. Большинство физико-химических методов имеют погрешность в пределах 2–5 %, что превышает погрешность химических методов анализа. Однако такое сравнение погрешностей не вполне корректно, так как оно относится к разным концентрационным областям. При небольшом содержании определяемого компонента (около  $10^{-3}$  % и менее) классические химические методы анализа вообще непригодны; при больших концентрациях физико-химические методы успешно соперничают с химическими. К числу существенных недостатков большинства ФХМА относится обязательное наличие эталонов и стандартных растворов.

Физико-химические методы приобретают все большее значение для целей объективной идентификации и количественного определения веществ. Получивший распространение в различных отраслях неdestructивный анализ (без разрушения анализируемого объекта) играет важную роль и в экологическом анализе.

По сравнению с классическими химическими методами ФХМА отличаются меньшим пределом обнаружения, временем и трудоемкостью. ФХМА позволяют проводить анализ на расстоянии, автоматизировать процесс анализа и выполнять его без разрушения образца (неdestructивный анализ).

При использовании ФХМА для получения информации о химическом составе вещества исследуемый образец подвергают воздействию какого-либо вида энергии. В зависимости от вида энергии в веществе происходит изменение энергетического состояния составляющих его частиц (молекул, ионов, атомов), выражающееся в изменении того или иного свойства (например, окраски, магнитных свойств и т. п.). Регистрируя изменение этого свойства как аналитический сигнал, получают информацию о качественном и количественном составе исследуемого объекта или о его структуре.

Эти методы анализа обладают многими достоинствами: быстротой анализа, высокой чувствительностью, возможностью одновременного определения нескольких компонентов, сочетания нескольких методов, автоматизации и использования компьютеров для обработки результатов анализа. Как правило, в инструментальных методах анализа применяются сенсоры (датчики) и, прежде всего химические сенсоры, которые дают информацию о составе среды, в которой они находятся. Остановимся на некоторых методах, основанных на законах и принципах, рассмотренных ранее в курсе химии.

В отличие от химических методов инструментальные методы анализа позволяют одновременно устанавливать качественный и количественный состав веществ быстро и достаточно точно. Примерами качественного аналитического сигнала в физических и физико-химических методах могут служить длина волны поглощаемого или испускаемого веществом электромагнитного излучения в спектроскопии ( $\lambda$ ), параметры удерживания в хроматографии (время удерживания  $t_R$ ), потенциал полуволны в полярографии ( $E_{1/2}$ ), а количественным аналитическим сигналом являются интенсивность поглощения или испускания электромагнитного излучения (оптическая плотность  $A$ ), площадь хроматографического пика (пятна) ( $S$ ), величина диффузионного тока ( $I_d$ ). Спектр вещества получают, воздействуя на него температурой, потоком электронов, световым потоком (электромагнитной энергией) с определенной длиной волны (частоты излучения) и другими способами. При определенной величине энергии воздействия вещество способно перейти в возбужденное состояние. При этом происходят процессы, приводящие к появлению в спектре излучения с определенной длиной волны.

Физико-химические методы позволяют определять малое содержание компонентов в анализируемых объектах. Они снизили предел обнаружения до  $10^{-5}$ – $10^{-10}$  % (в зависимости от метода анализа). Химические методы анализа (титриметрический и гравиметрический) не позволяют обнаружить такое количество определяемого компонента. Их предел обнаружения –  $10^{-3}$  %.

Физико-химические методы позволяют проводить анализ достаточно быстро. Экспрессность этих методов дает возможность корректировать технологический процесс. Инструментальные методы анализа позволяют автоматизировать сам процесс анализа, а некоторые приборы – проводить анализ на расстоянии. Анализ можно проводить с помощью физико-химических методов без разрушения анализируемого образца и в какой-то определенной точке. Достоинством физико-химических методов анализа является использование ЭВМ как для расчета результатов анализа, так и для решения других аналитических вопросов.

*Недостатки* физико-химических методов анализа заключаются в том, что погрешность анализов составляет 2–5 %, что выше погрешности классических химических методов.

Для применения физико-химических методов требуются дорогостоящие приборы, эталоны и стандартные растворы.

## 2. Классификация физико-химических методов анализа

По виду энергии возмущения и измеряемого свойства (аналитического сигнала) ФХМА можно классифицировать следующим образом (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Методы анализа

Вид энергии возмущения	Измеряемое свойство	Методы	Группы методов
Поток электронов (электрохимические реакции в растворах и на электродах)	Напряжение, потенциал	Потенциометрия	Электрохимические
	Ток поляризации электродов	Вольтамперометрия, полярография	
	Сила тока	Амперометрия	
	Сопротивление, проводимость	Кондуктометрия	
	Импеданс (сопротивление переменному току, емкость)	Осциллометрия, высокочастотная кондуктометрия	
	Количество электричества	Кулонометрия	
	Масса продукта электрохимической реакции	Электрогравиметрия	
	Диэлектрическая проницаемость	Диэлкометрия	
Электромагнитное излучение	Длина волны и интенсивность спектральной линии в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой частях спектра $\lambda = 10^{-3} \dots 10^{-8}$ м	Оптические методы (ИК-спектроскопия, атомно-эмиссионный анализ, атомно-абсорбционный ана-	Спектральные

		лиз, фотометрия, люминисцентный анализ, турбидиметрия, нефелометрия)	
	То же, но в рентгеновской области спектра $\lambda = 10^{-8} \dots 10^{-11}$ м	Рентгеновская фотоэлектронная, оже-спектроскопия	
	Времена релаксации и химический сдвиг	Спектроскопия ядерномагнитного (ЯМР) и электронного парамагнитного (ЭПР) резонанса	
Теплота	Температура	Термический анализ	Тепловые
	Количество теплоты	Термогравиметрия	
	Энтальпия	Калориметрия	
	Механические свойства	Термометрический анализ (энтальпиметрия)	
Энергия химических и физических взаимодействий	Дилатометрия	Газовая, жидкостная, осадочная, ионообменная, гелепроникающая хроматография	Хроматографические

Кроме перечисленных в таблице, существует множество других частных ФХМА, не подпадающих под данную классификацию.

Наибольшее практическое применение имеют оптические, хроматографические и потенциометрические методы анализа.

В агрохимическом анализе наиболее широко используют физико-химические методы, которые могут быть классифицированы на следующие группы: оптические методы; методы, основанные на поглощении излучения; методы, основанные на испускании излучения; методы, основанные на использовании магнитного поля; электрохимические методы; методы разделения; термические методы.

Большинство перечисленных методов (за исключением оптических, электрохимических и термических) широко применяют для установления химической структуры органических соединений.

Среди физико-химических методов наибольшее практическое применение имеют спектральные и другие оптические методы; электрохимические и хроматографические методы анализа. Наиболее обширной по числу методов и важной по практическому значению является группа спектральных и других оптических методов. Эти методы основаны на взаимодействии веществ с электромагнитным излучением. Известно много различных видов электромагнитных излучений:  $\gamma$ -лучи, рентгеновское излучение, ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное, микроволновое и радиочастотное. В зависимости от типа взаимодействия электромагнитного излучения с веществом оптические методы классифицируются следующим образом. На измерении эффектов поляризации молекул вещества основаны **рефрактометрия, интерферометрия и поляриметрия**. Анализируемые вещества

могут поглощать электромагнитное излучение и на основе использования этого явления выделяют группу абсорбционных оптических методов. Поглощение света атомами анализируемых веществ используется в атомно-абсорбционном анализе. Способность поглощать свет молекулами и ионами в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра позволила создать **молекулярно-абсорбционный** анализ (колориметрию, фотокolorиметрию, спектрофотометрию, ИК-спектроскопию). Поглощение и рассеяние света взвешенными частицами в растворе (суспензии) привело к появлению методов **турбидиметрии** и **нефелометрии**. Методы, основанные на измерении интенсивности излучения, возникающего в результате выделения энергии возбужденными молекулами и атомами анализируемого вещества, называются **эмиссионными** методами. К молекулярно-эмиссионным методам относят люминесценцию (флуоресценцию), к атомно-эмиссионным – эмиссионный спектральный анализ и плазменную фотометрию.

Электрохимические методы анализа основаны на измерении электрической проводимости (кондуктометрия); разности потенциалов (потенциометрия); количества электричества, прошедшего через раствор (кулонометрия); зависимости величины тока от приложенного потенциала (вольтамперометрия); времени, необходимого для прохождения электрохимической реакции (хроноэлектрохимические методы).

В группу хроматографических методов анализа входят методы газовой и газожидкостной хроматографии, распределительной, тонкослойной, адсорбционной, ионообменной и других видов. Наибольшее практическое применение имеют оптические, хроматографические и потенциометрические методы анализа.

По сравнению с классическими химическими методами ФХМА отличаются меньшим пределом обнаружения, временем и трудоемкостью. ФХМА позволяют проводить анализ на расстоянии, автоматизировать процесс анализа и выполнять его без разрушения образца (недеструктивный анализ).

Излучение, поглощение, рассеяние или рефракция электромагнитного излучения может рассматриваться как аналитический сигнал, несущий информацию о качественном и количественном составе вещества или о его структуре. Частота (длина волны) излучения определяется составом исследуемого вещества, а интенсивность излучения пропорциональна числу частиц, вызвавших его появление, т. е. количеству вещества или компонента смеси.

Каждый из аналитических методов обычно использует не полный спектр вещества, охватывающий диапазон длин волн от рентгеновских излучений до радиоволн, а только определенную его часть. Спектральные методы обычно различают по диапазону длин волн спектра, являющемуся рабочим для данного метода: ультрафиолетовые (УФ), рентгеновские, инфракрасные (ИК), микроволновые и т. д.

Методы, работающие в УФ, видимом и ИК диапазоне, называют оптическими. Они больше всего применяются в спектральных методах вследствие сравнительной простоты оборудования для получения и регистрации спектра.

Атомно-эмиссионный анализ (АЭА) основан на качественном и количественном определении атомного состава вещества путем получения и изучения спектров эмиссии атомов, входящих в состав вещества.

По способам определения различают прямые и косвенные ФХМА. В прямых методах количество вещества находят непосредственным пересчетом измеренного аналитического сигнала в количество вещества (массу, концентрацию) с помощью уравнения связи. В косвенных методах аналитический сигнал используется для установления конца химической реакции (как своеобразный индикатор), а количество определяемого вещества, вступившего в реакцию, находят с помощью закона эквивалентов, т. е. по уравнению, непосредственно не связанному с названием метода.

По способу количественных определений различают безэталоновые и эталонные инструментальные методы анализа.

Безэталоновые методы основаны на строгих закономерностях, формульное выражение которых позволяет пересчитать интенсивность измеренного аналитического сигнала непосредственно в количестве определяемого вещества с привлечением только табличных величин. В качестве такой закономерности может выступать, например, закон Фарадея, позволяющий по току и времени электролиза рассчитать количество определяемого вещества в растворе при кулонометрическом титровании. Безэталоновых методов очень мало, поскольку каждое аналитическое определение представляет собой систему сложных процессов, в которых невозможно теоретически учесть влияние каждого из многочисленных действующих факторов на результат анализа. В связи с этим при анализах пользуются определенными приемами, позволяющими экспериментально учесть эти влияния. Наиболее распространенным приемом является применение эталонов, т. е. образцов веществ или материалов с точно известным содержанием определяемого элемента (или нескольких элементов). При проведении анализа измеряют определяемое вещество исследуемого образца и эталона, сравнивают полученные данные и по известному содержанию элемента в эталоне рассчитывают содержание этого элемента в анализируемом образце. Эталоны могут быть изготовлены промышленным способом (стандартные образцы) или приготавливаются в лаборатории непосредственно перед проведением анализа (образцы сравнения). Если в качестве стандартных образцов применяют химически чистые вещества (примесей меньше 0,05 %), то их называют стандартными веществами.

На практике количественные определения инструментальными методами осуществляют по одному из трех способов: градуировочной функции (стандартных серий), стандартов (сравнения) или стандартных добавок.

При работе по методу градуировочной функции с помощью стандартных веществ или стандартных образцов получают ряд образцов (или растворов),

содержащих различные, но точно известные количества определяемого компонента. Иногда этот ряд называют стандартной серией. Затем проводят анализ этой стандартной серии и по полученным данным вычисляют значение чувствительности  $K$  (в случае линейной градуировочной функции). После этого измеряют интенсивность аналитического сигнала  $A$  в исследуемом объекте и вычисляют количество (массу, концентрацию) искомого компонента с помощью уравнения связи  $A = Kl$  или находят по градуировочному графику.

Химический анализ в значительной мере базируется на успехах спектроскопии (оптической, рентгеновской, радиочастотной), ядерной физики и других разделов физики.

В зависимости от того, с каким количеством вещества оперируют при выполнении анализа различают макро-, полумикро-, микро- и ультрамикроанализ:

Вид анализа	Масса вещества, г	Объем раствора, мл
Макроанализ	0,1–1,0	10–50
Полумикроанализ	0,01–0,10	1–10
Микроанализ	0,001–0,010	0,1–0,5
Ультрамикроанализ	<0,001 (до 10 <sup>-6</sup> )	<0,01

Многие методы анализа совершенствуются главным образом под влиянием постоянного развития соответствующих разделов физики и на базе прогресса в приборостроении.

Общим для всех анализов являются:

- теория пробоотбора;
- метрология химического анализа;
- методика сопоставления методов и выбора их при решении конкретной задачи.

Метрология имеет большое значение в различных сферах, в том числе и в ФХМА.

Химический анализ – сложный многостадийный процесс. Можно выделить следующие этапы анализа любого объекта:

- постановка задачи;
- выбор метода и схемы анализа;
- отбор пробы;
- подготовка пробы к анализу;
- проведение анализа и измерение;
- обработка результатов измерений.

Это деление условно: каждый этап может быть относительно сложным и состоять из многих отдельных стадий.

### 3. Величины ПДК основных токсичных элементов

Существуют две основные характеристики токсичности ЛД<sub>50</sub> и ЛД<sub>100</sub>. ЛД – аббревиатура летальной дозы, т. е. дозы, вызывающей при однократном введении гибель 50 или 100 % экспериментальных животных. Дозу обычно определяют в размерности концентрации. Токсичными считают все те вещества, для которых ЛД мала. Принята следующая классификация веществ по признаку острой токсичности (ДЦ<sub>50</sub> для крысы при пероральном введении, мг/кг):

Чрезвычайно токсичные .....	<5
Высокотоксичные.....	5–50
Умеренно токсичные .....	50–500
Малотоксичные.....	500–5 000
Практически нетоксичные .....	5 000–15 000
Практически безвредные.....	>15 000

Величина  $t_{05}$  характеризует время полувыведения токсина и продуктов его превращения из организма. Для разных токсинов оно может составлять от нескольких часов до нескольких десятков лет. Кроме ЛД<sub>50</sub>, ЛД<sub>100</sub> и  $t_{05}$  в токсикологических экспериментах на животных принято указывать еще и время 100 или 50 % гибели объектов. Но для этого такие эксперименты должны проводиться в течение многих месяцев и лет, а при существующем непродолжительном контроле можно отнести к малотоксичным веществам – высокотоксичные, но проявляющие свое негативное, губительное действие лишь через длительное время. Кроме этого необходимо учитывать еще ряд факторов. Это и индивидуальность различных экспериментальных животных, и различное распределение токсинов в органах и тканях, и биотрансформация токсинов, которая затрудняет их определение в организме.

При хронической интоксикации решающее значение приобретает способность вещества проявлять кумулятивные свойства, т. е. накапливаться в организме и передаваться по пищевым цепям. Необходимо также учитывать комбинированное действие нескольких чужеродных веществ при одновременном и последовательном поступлении в организм и их взаимодействие с макро- и микронутриентами пищевых продуктов (так как человек может получать в течение всей жизни вместе с пищей целый комплекс чужеродных веществ либо в виде контаминантов-загрязнителей, либо в виде добавок к пищевым продуктам).

Комбинированный эффект является результатом физических или химических взаимодействий, индукции или ингибирования ферментных систем, других биологических процессов. Действие одного вещества может быть усилено или ослаблено под влиянием других веществ.

Различают два основных эффекта: **антагонизм** – эффект воздействия двух или нескольких веществ, при котором одно вещество ослабляет действие другого вещества (например, действие ртути и селена в организме животных и человека); **синергизм** – эффект воздействия, превышающий сумму эффектов воздействия каждого фактора (например, комбинированное воздействие хлорсодержащих соединений, фосфорорганических пестицидов, комбинированное воздействие ксенобиотиков и некоторых медикаментов).

В связи с хроническим воздействием посторонних веществ на организм человека и возникающей опасностью отдаленных последствий важнейшее значение приобретают **канцерогенное** (возникновение раковых опухолей), **мутагенное** (качественные и количественные изменения в генетическом аппарате клетки) и **тератогенное** (аномалии в развитии плода, вызванные структурными, функциональными и биохимическими изменениями в организме матери и плода) действия ксенобиотиков.

На основе токсикологических критериев (с точки зрения гигиены питания) международными организациями ООН – ВОЗ, ФАО и др., а также органами здравоохранения отдельных государств приняты следующие базисные (основные) показатели: ПДК, ДСД и ДСП.

**ПДК** (предельно-допустимая концентрация) – предельно-допустимые количества чужеродных веществ в атмосфере, воде, продуктах питания с точки зрения безопасности их для здоровья человека. ПДК в продуктах питания – установленное законом предельно-допустимое с точки зрения здоровья человека количество вредного (чужеродного) вещества. ПДК – это такие концентрации, которые при ежедневном воздействии в течение длительного времени не могут вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований, в жизни настоящего и последующих поколений.

**ДСД** (допустимая суточная доза) – ежедневное поступление вещества, которое не оказывает негативного влияния на здоровье человека в течение всей жизни.

**ДСП** (допустимое суточное потребление) – величина, рассчитываемая как произведение ДСД на среднюю величину массы тела (60 кг).

Токсичные элементы (в частности, некоторые тяжелые металлы) составляют обширную и весьма опасную в токсикологическом отношении группу веществ. Обычно рассматривают 14 элементов: Hg, Pb, Cd, As, Sb, Sn, Zn, Al, Be, Fe, Cu, Ba, Cr, Tl. Разумеется, не все перечисленные элементы являются ядовитыми, некоторые из них необходимы для нормальной жизнедеятельности человека и животных. Поэтому часто трудно провести четкую границу между биологически необходимыми и вредными для здоровья человека веществами.

В большинстве случаев реализация того или иного эффекта зависит от концентрации. При повышении оптимальной физиологической концентрации элемента в организме может наступить интоксикация, а дефицит многих элементов в пище и воде может привести к достаточно тяжелым и трудно распознаваемым явлениям недостаточности.

Для большинства продуктов установлены ПДК токсичных элементов, к детским и диетическим продуктам предъявляются более жесткие требования. Наибольшую опасность из вышеназванных элементов представляют ртуть, свинец, кадмий.

**Ртуть** – один из самых опасных и высокотоксичных элементов, обладающий способностью накапливаться в растениях и в организме животных и человека, т. е. является ядом кумулятивного действия.

Токсичность ртути зависит от вида ее соединений, которые по-разному всасываются, метаболизируются и выводятся из организма. Наиболее токсичны алкилртутные соединения с короткой цепью – метилртуть, этилртуть, диметилртуть. Механизм токсического действия ртути связан с ее взаимодействием с сульфгидрильными группами белков. Блокируя их, ртуть изменяет свойства или инактивирует ряд жизненно важных ферментов. Неорганические соединения ртути нарушают обмен аскорбиновой кислоты, пиридоксина, кальция, меди, цинка, селена; органические – обмен белков, цистеина, аскорбиновой кислоты, токоферолов, железа, меди, марганца, селена.

Защитным эффектом при воздействии ртути на организм человека обладают цинк и особенно селен. Предполагают, что защитное действие селена обусловлено демегилированием ртути и образованием нетоксичного соединения – селено-ртутного комплекса.

**Свинец** – один из самых распространенных и опасных токсикантов. Основным источником загрязнения атмосферы свинцом являются выхлопные газы автотранспорта (260 тыс. тонн) и сжигание каменного угля (около 30 тыс. тонн). Следует подчеркнуть, что многие растения накапливают свинец, который передается по пищевым цепям и обнаруживается в мясе и молоке сельскохозяйственных животных, особенно активное накопление свинца происходит вблизи промышленных центров и крупных автомагистралей.

Механизм токсического действия свинца имеет двойную направленность. Во-первых, блокада функциональных SH-групп белков и, как следствие, – инактивация ферментов, во-вторых, проникновение свинца в нервные и мышечные клетки, образование лактата свинца, затем фосфата свинца, которые создают клеточный барьер для проникновения ионов  $Ca^{2+}$ . Основными мишенями при воздействии свинца являются кроветворная, нервная и пищеварительная системы, а также почки. Свинцовая интоксикация может приводить к серьезным нарушениям здоровья, проявляющимся в частых головных болях, головокружениях, повышенной утомляемости, раздражительности,

ухудшении сна, мышечной гипотонии, а в наиболее тяжелых случаях – к параличам и парезам, умственной отсталости.

Неполноценное питание, дефицит в рационе кальция, фосфора, железа, пектинов, белков (или повышенное поступление кальциферола) увеличивают усвоение свинца, а следовательно, – его токсичность. Допустимая суточная доза (ДСД) свинца составляет 0,007 мг/кг; величина ПДК в питьевой воде – 0,05 мг/л.

**Кадмий.** Установлено, что примерно 80 % кадмия поступает в организм человека с пищей, 20 % – через легкие из атмосферы и при курении. С рационом взрослый человек получает до 150 мкг/кг и выше кадмия в сутки. Подобно ртути и свинцу, кадмий не является жизненно необходимым металлом. Попадая в организм, кадмий проявляет сильное токсическое действие, главной мишенью которого являются почки. Механизм токсического действия кадмия связан с блокадой сульфгидрильных групп белков; кроме того, он является антагонистом цинка, кобальта, селена, ингибирует активность ферментов, содержащих указанные металлы. Известна способность кадмия нарушать обмен железа и кальция. Все это может привести к широкому спектру заболеваний: гипертоническая болезнь, анемия, ишемическая болезнь сердца, почечная недостаточность и др. Отмечены канцерогенный, мутагенный и тератогенные эффекты кадмия. По рекомендациям ВОЗ, допустимая суточная доза (ДСД) кадмия – 1 мкг/кг массы тела.

Большое значение в профилактике интоксикации кадмием имеет правильное питание (включение в рацион белков, богатых серосодержащими аминокислотами, аскорбиновой кислоты, железа, цинка, селена, кальция), контроль за содержанием кадмия (полярнографический, атомно-абсорбционный анализы) и исключение из рациона продуктов, богатых кадмием.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аналитическая химия: метод. указания к вып. лаб. работ: в 2 ч. / сост. Т. В. Беляева. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2002. – Ч. 2: Физико-химические методы анализа. – 99 с.
2. Барковский, Е. В. Аналитическая химия: учеб. пособие / Е. В. Барковский. – Минск: Вышэйш. шк., 2004. – 351 с.
3. Васильев, В. П. Теоретические основы физико-химических методов анализа: учеб. пособие / В. П. Васильев. – Москва, 1979. – 184 с.
4. Введение в лабораторный практикум по неорганической химии: учеб. пособие / В. В. Свиридов [и др.]. – Минск: Вышэйш. шк., 2003. – 96 с.
5. Дорохова, Е. Н. Аналитическая химия. Физико-химические методы анализа: учебник / Е. Н. Дорохова, Г. В. Прохорова. – Москва: Высш. шк., 1991. – 256 с.
6. Коренман, Я. И. Практикум по аналитической химии (Оптические методы анализа): учеб. пособие / Я. И. Коренман. – Воронеж, 1989. – 228 с.
7. Лабораторный практикум по агрохимии для агрономических специальностей: учеб. пособие / А. Н. Есаулко [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: Колос; Ставрополь: АГРУС, 2008. – 260 с.
8. Лидин, Р. А. Химические свойства неорганических веществ / Р. А. Лидин, В. А. Молочко, Л. Л. Андреева; под ред. Р. А. Лидина. – 5-е изд. – Москва: КолосС, 2008. – 480 с.
9. Лопатин, Б. А. Теоретические основы электрохимических методов анализа / Б. А. Лопатин. – Москва, 1975. – 295 с.
10. Методы определения микроколичеств пестицидов в продуктах питания, кормах и внешней среде: в 2 т. / под ред. М. А. Клисенко. – Москва, 1992. – Т. 1, 2. – 450 с.
11. Основы аналитической химии: учебник: в 2 кн. / Ю. А. Золотов [и др.]; под ред. Ю. А. Золотова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 2004. – Кн. 2: Методы химического анализа. – 361 с.
12. Отто, М. Современные методы аналитической химии / М. Отто. – Изд. 3-е. – Москва: Техносфера, 2008. – 552 с.
13. Пентин, Ю. В. Физические методы исследования в химии / Ю. А. Пентин, Л. В. Вилков. – Мир, 2012. – 688 с.
14. Практикум по общей и биоорганической химии: учеб. пособие / под ред. В. А. Попкова. – 3-е изд. – Москва: Издат. центр «Академия», 2008. – 240 с.
15. Русин, Г. Г. Физико-химические методы анализа в агрохимии / Г. Г. Русин. – Москва, 1990. – 360 с.
16. Соколовский, А. Е. Физико-химические методы анализа: тексты лекций / А. Е. Соколовский, Е. В. Радион. – Минск: БГТУ, 2008. – 118 с.
17. Сычев, С. Н. Высокоэффективная жидкостная хроматография / С. Н. Сычев. – СПб.: ЛАНЬ, 2013. – 256 с.
18. Химия. Лабораторный практикум: учеб. пособие / А. Р. Цыганов [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2015. – 320 с.
19. Цыганов, А. Р. Сборник задач и упражнений по химии: учеб. пособие / А. Р. Цыганов, О. В. Поддубная. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 236 с.

Составители

**Поддубная** Ольга Владимировна  
**Ковалева** Ирина Владимировна