

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ  
ВЕЩЕСТВ И ГИБРИДНЫЕ  
МЕТОДЫ АНАЛИЗА



# **АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

## **МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ И ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

Под редакцией профессора Л. Н. Москвина

**ДОПУЩЕНО**

*Учебно-методическим объединением по классическому университетскому образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Химия»*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР  
2019

ББК 24.4я73

А 64

**А 64** Аналитическая химия. Методы разделения веществ и гибридные методы анализа: Учебник / Под ред. Л. Н. Москвина. — СПб.: Издательство «Лань», 2019. — 332 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-3394-0**

Цикл книг, подготовленных коллективом авторов из Санкт-Петербургского университета, содержит важнейшие разделы современной аналитической химии. Вторая книга учебника посвящена методам разделения, применяемым в аналитической химии и созданным на их основе гибридным методам анализа — методам, в которых в одной аналитической процедуре сочетаются методы разделения и методы определения разделенных веществ.

Рассмотрению отдельных методов разделения и концентрирования анализов предпослана их общая классификация, а рассмотрение методов в рамках отдельных групп, выделяемых согласно этой классификации, начинается с внутригрупповых классификаций, что позволяет легко сориентироваться во всем многообразии методов разделения, увидеть взаимосвязь между ними и подходы к выбору адекватных решений различных аналитических задач.

В число гибридных методов, рассматриваемых в данной книге, входят в первую очередь хроматографические и масс-спектральные методы, являющиеся в настоящее время одними из основных методов химического анализа. Здесь также значительное внимание удалено систематизации методов и общим физико-химическим закономерностям, лежащим в основе предлагаемых схем классификации. При этом четко расставлены акценты между хроматографическими методами разделения и хроматографическими методами анализа. Обоснована целесообразность выделения масс-спектрометрии из раздела, посвященного спектральным методам, и рассмотрение ее в разделе, посвященном гибридным методам.

Учебник рассчитан на студентов, обучающихся по программам специалитета, магистратуры и аспирантуры направлений подготовки и специальностей, входящих в УГС: «Химия» и «Химические технологии». Книга также будет полезна магистрам и аспирантам, специализирующимся в области аналитической химии.

ББК 24.4я73

**Рецензенты:**

*Ю. А. КАРЛОВ* — доктор химических наук, академик РАН;

*Т. Н. ШЕХОВЦОВА* — профессор,

зам. зав. кафедрой аналитической химии, зам. председателя Методической комиссии химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, председатель Комиссии по преподаванию аналитической химии НСАХ РАН.

**Обложка**  
*Е. А. ВЛАСОВА*

© Издательство «Лань», 2019  
© Коллектив авторов, 2019  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие .....</i>	3
<i>Список наиболее часто употребляемых специальных терминов, аббревиатур и принятых сокращений .....</i>	5
<i>Введение .....</i>	7
 <i>Часть первая</i> <i>Методы разделения и концентрирования</i>	
<i>Глава 1. Общая классификация методов разделения .....</i>	13
1.1. Основные понятия .....	13
1.2. Проблема классификации методов разделения и попытки ее решения .....	14
1.3. Методы разделения гетерогенных смесей .....	17
1.4. Классификация методов разделения гомогенных смесей веществ .....	19
<i>Глава 2. Методы разделения, основанные на образовании выделяемыми веществами новых фаз .....</i>	22
2.1. Классификация и общая характеристика методов .....	22
2.2. Методы, основанные на образовании твердых и жидкких фаз .....	24
2.3. Методы, основанные на различиях, проявляемых веществом при фазовых переходах в системе жидкость — газ .....	30
2.4. Методы, основанные на проявлении различий в характеристических свойствах при фазовых переходах твердая фаза — жидкость .....	39
<i>Глава 3. Методы разделения, основанные на различиях в распределении веществ между фазами .....</i>	43
3.1. Внутригрупповая классификация и общая характеристики методов .....	43
3.2. Жидкостно-жидкостная экстракция .....	46

<b>3.3. Методы разделения, основанные на распределении веществ в системах жидкость — твердая фаза и газ — твердая фаза . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>3.4. Методы разделения, основанные на распределении веществ в системе жидкость — газ . . . . .</b>	<b>88</b>
<b>3.5. Сверхкритическая флюидная экстракция . . . . .</b>	<b>96</b>
<b>Глава 4. Хроматография. Терминологический и методологический аспекты. . . . .</b>	<b>99</b>
<b>4.1. Введение . . . . .</b>	<b>99</b>
<b>4.2. Классификация хроматографических методов . . . . .</b>	<b>102</b>
<b>4.3. Теоретические основы хроматографии . . . . .</b>	<b>110</b>
<b>4.4. Практические следствия теоретических представлений о хроматографическом процессе . . . . .</b>	<b>123</b>
<b>4.5. Хроматографические методы, являющиеся вариантами хроматографического способа осуществления процесса межфазного распределения . . . . .</b>	<b>130</b>
<b>4.6. Хроматографические методы, основанные на распределении веществ в системе жидкость — твердая фаза (ЖТХ) . . . . .</b>	<b>139</b>
<b>4.7. Хроматографические методы, основанные на распределении веществ в системе жидкость — жидкость. Жидкостно-жидкостная хроматография (ЖЖХ) . . . . .</b>	<b>151</b>
<b>4.8. Газоадсорбционная хроматография . . . . .</b>	<b>157</b>
<b>4.9. Хроматографические методы в системе жидкость — газ . . . . .</b>	<b>160</b>
<b>Глава 5. Мембранные методы разделения веществ . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>5.1. Общие сведения о мембранах и мембранных методах разделения . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>5.2. Диффузионные методы . . . . .</b>	<b>175</b>
<b>5.3. Электромембранные методы . . . . .</b>	<b>180</b>
<b>5.4. Баромembrанные методы . . . . .</b>	<b>183</b>
<b>Глава 6. Методы внутрифазного разделения . . . . .</b>	<b>188</b>
<b>6.1. Принципы внутрифазного разделения . . . . .</b>	<b>188</b>
<b>6.2. Электрофорез . . . . .</b>	<b>190</b>
<b>6.3. Проточное фракционирование в поперечном поле (ППФ-методы) . . . . .</b>	<b>196</b>
<b>Глава 7. Комбинированные методы разделения . . . . .</b>	<b>202</b>
<b>7.1. Общие принципы комбинированных методов . . . . .</b>	<b>202</b>
<b>7.2. Оптические методы разделения . . . . .</b>	<b>203</b>
<b>7.3. Хроматомембранный массообменный процесс и хроматомембранные методы разделения . . . . .</b>	<b>204</b>
<b>7.4. Электрохроматография . . . . .</b>	<b>215</b>
<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b>	<b>329</b>

**Часть вторая**  
**Гибридные методы анализа**

<b>Глава 8. Хроматографические методы анализа . . . . .</b>	<b>223</b>
8.1. Хроматографический анализ и основные схемы его реализации . . . . .	223
8.2. Газовая хроматография . . . . .	234
8.3. Жидкостная хроматография . . . . .	250
8.4. Сверхкритическая флюидная хроматография (СФХ) . . . . .	262
<b>Глава 9. Капиллярный электрофорез (КЭ) и мицеллярная электрокинетическая хроматография (МЭКХ) . . . . .</b>	<b>268</b>
9.1. Схема анализа в КЭ и МЭКХ . . . . .	268
9.2. Детектирование в КЭ и МЭКХ . . . . .	269
9.3. Применение КЭ и МЭКХ . . . . .	271
<b>Глава 10. Масс-спектрометрия . . . . .</b>	<b>273</b>
10.1. Общая характеристика метода . . . . .	273
10.2. Основные правила масс-спектрометрической символики и точность измерения масс-ионов . . . . .	276
10.3. Основные узлы масс-спектрометров и принципы их функционирования . . . . .	281
10.4. Масс-спектральное определение летучих органических соединений . . . . .	294
10.5. Масс-спектральный анализ неорганических объектов . . . . .	298
<b>Глава 11. Спектрометрия ионной подвижности . . . . .</b>	<b>308</b>
11.1. Введение . . . . .	308
11.2. Основы метода . . . . .	309
11.3. Методы ионизации . . . . .	309
11.4. Введение пробы . . . . .	311
11.5. Спектрометрия ионной подвижности с продольным полем . . . . .	311
11.6. Спектрометрия приращения ионной подвижности . . . . .	312
11.7. <i>IMS</i> с бегущей волной . . . . .	314
11.8. <i>IMS</i> с захватом ионов . . . . .	315
11.9. Дифференциальный спектрометр ионной подвижности . . . . .	315
11.10. Открытая петля . . . . .	315

11.11. Разрешение . . . . .	315
11.12. Мульти капиллярная колонка . . . . .	316
<b>Глава 12. Гибридные методы на принципах двумерных методов детектирования . . . . .</b>	<b>318</b>
12.1. Общие принципы методов . . . . .	318
12.2. Сложные гибридные методы, нашедшие наибольшее распространение. . . . .	318
<i>Список литературы . . . . .</i>	324