

Наноразмерные материалы в аналитической атомной спектроскопии

И. В. Кубракова, д. х. н.^{1,2}, Д. В. Пряжников, к. х. н.¹,
О. Н. Тютюнник, к. х. н.¹, М. С. Киселева, к. х. н.¹, О. О. Ефанова¹

УДК 543.054

Разнообразие свойств высокодисперсных (нано) материалов обусловило перспективность их использования в неорганическом анализе, включая атомную спектроскопию (атомно-абсорбционная спектроскопия, атомно-эмиссионная и масс-спектроскопия с индуктивно связанной плазмой). Эти материалы применяются в качестве твердофазных экстрагентов и матричных модификаторов, а также являются объектами анализа.

В статье рассмотрены пути получения и характеристики наночастиц; приведены данные о структуре и свойствах магнитных наночастиц, предназначенных для решения аналитических и биомедицинских задач; показана возможность повышения чувствительности и селективности определения ряда элементов при использовании наночастиц в атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией и в методе холодного пара. Проанализированы новые возможности спектроскопических методов для биоаналитических приложений с участием наночастиц, включая масс-спектроскопию с индуктивно связанной плазмой в режиме единичных частиц.

Ключевые слова: методы атомной спектроскопии (ЭТААС, АЭС-ИСП, МС-ИСП), наноразмерные материалы, твердофазные экстрагенты, матричные модификаторы, биоанализ

Введение

Большой потенциал применения наноразмерных материалов привлекает внимание специалистов самых разных областей науки и технологии. В этой работе рассмотрено сочетание возможностей этих материалов с методами атомной спектроскопии – наиболее важным и распространенным инструментом неорганического анализа.

Наноразмерные материалы – разнообразные по структуре, свойствам и областям применения объекты с характерными линейными размерами в диапазоне 1–100 нм. Размерность частиц обеспечивает их высокую удельную поверхность и потенциально высокую сорбционную способность. Кроме

того, возможности таких частиц могут быть существенно расширены за счет химического модифицирования поверхности (сорбционного слоя).

Получение поверхностно-модифицированных наноматериалов достаточно просто: сначала надо синтезировать носитель (рис. 1), а потом выбранным способом его модифицировать.

Один из наиболее перспективных видов наноматериалов – магнитные. Сочетание сорбционных и магнитных свойств делают их эффективным и простым в применении материалом для решения задач, включающих разделение компонентов на основе химического взаимодействия компонентов и их магнитной сепарации. Существуют различные варианты для простого, быстрого, дешевого получения наночастиц магнитного носителя (магнетита Fe_3O_4 и др.): путем соосаждения, синтеза в мицеллах, гидротермального синтеза,

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), Москва.

² kubrakova@geokhi.ru.

термического разложения металлоорганических соединений, микроволнового синтеза.

Функционализацию поверхности носителя можно осуществить путем ковалентного «пришивания» или силанизации, а также путем нековалентной адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) на поверхности оксида. Носитель удобно синтезировать в условиях микроволнового нагрева; таким же образом в наших работах модифицирована поверхность. В результате получен целый ряд материалов, оболочки наночастиц которых (в том числе многослойные) имели различную структуру: $\text{Fe}_3\text{O}_4@OK$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@ЦТАБ$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@PVP$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@TEOS$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@TEOS/MPTMS@Au^0@DOX$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@TEOS@ЦТАБ$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@TEOS@ЦТАБ@TEOS$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@TEOS@ЦТАБ@TEOS+MPTEOS$ [1, 2]. В качестве агентов, модифицирующих поверхность магнетита и образующих частицы «ядро – оболочка», были использованы: ПАВы (олеиновая кислота (ОК), бромид цетилтриметиламмония (ЦТАБ)), образующие организованные структуры путем самосборки; полимеры (поливинилпирролидон (PVP), в том числе кремнийорганические (TEOS, MPTEOS)), формирующие слои различной структуры, включая мезопористые, путем силанирования; коллоидное золото [Кубракова И. В., Кошечева И. Я., Пряжников Д. В., Мартынов Л. Ю., Киселева М. С., Тютюнник О. А. *Журнал аналитической химии*. 2014. 69(4):378]. Кроме того, были синтезированы везикулярные структуры с магнитными свойствами (магнитосомы). Именно это разнообразие структуры и свойств и обуславливает широкое применение этих материалов, которые должны быть охарактеризованы максимально подробно.

Методы исследования состава и структуры наноразмерных материалов

Установление состава выполняют методами атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (ЭТААС), атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС), масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в сочетании с методами разделения по размерам (капиллярный электрофорез, высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), проточное фракционирование в поперечном силовом поле) или в режиме МС-анализа отдельных частиц, а также с использованием ЭДРС – метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии [2].

Структуру ядра исследуют методом рентгеновской дифракции, а геометрию, морфологию, структуру наночастиц (НЧ) (размеры, форму,

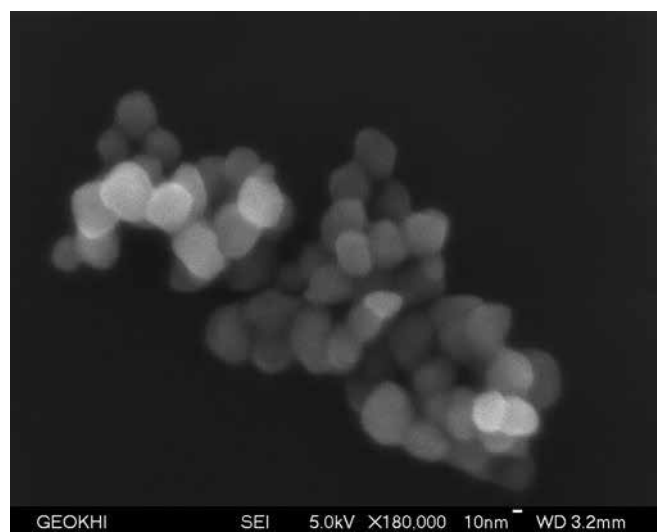


Рис. 1. Наноразмерный носитель (магнетит), поверхность которого можно модифицировать

монодисперсность, структуру ядра и оболочек на субнанометровом уровне) – методом динамического рассеяния света (ДРС) и методами электронной микроскопии (ЭМ).

Распределение по размерам выявляется с помощью эксклюзионной хроматографии, электрофореза, проточного фракционирования; магнитные свойства – путем оценки снижения намагниченности насыщения после процедур поверхностного модифицирования; температура блокировки – с помощью терромагнитных измерений.

Функциональные группы на поверхности и характер взаимодействия с поверхностью могут быть охарактеризованы с помощью инфракрасной спектроскопии (ИКС), а удельная площадь поверхности и распределение пор по размерам – методом низкотемпературной сорбции азота. Количественные характеристики упорядоченной мезопористой структуры можно получить методом малоуглового рассеяния рентгеновского излучения (МРРИ).

Так, дифрактограмма $\text{Fe}_3\text{O}_4+МПК$ (рис. 2) подтверждает наличие в образце единственной минеральной фазы – магнетита, а также позволяет оценить размер частиц (МПК – 3-меркаптопропионовая кислота).

Инфракрасные спектры $\text{Fe}_3\text{O}_4+OK+МПК$ доказывают ковалентное связывание ОК с поверхностью магнетита и присутствие S-содержащих групп (рис. 3). Эти данные подтверждают результаты СННС и ИСП-АЭС-анализа.

Структура модифицирующих слоев может быть установлена путем построения изотерм сорбции

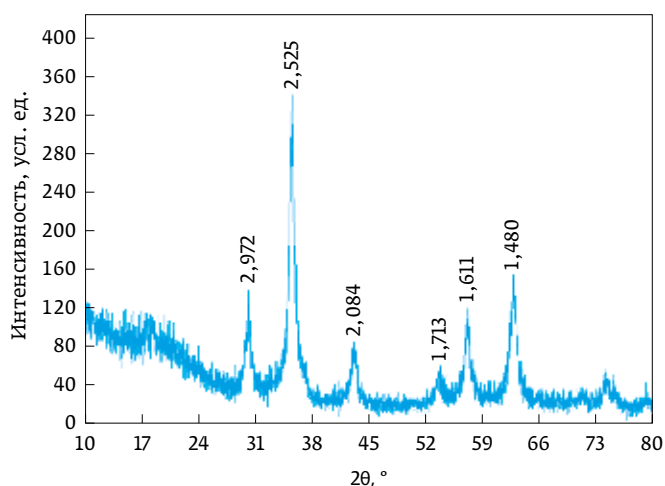
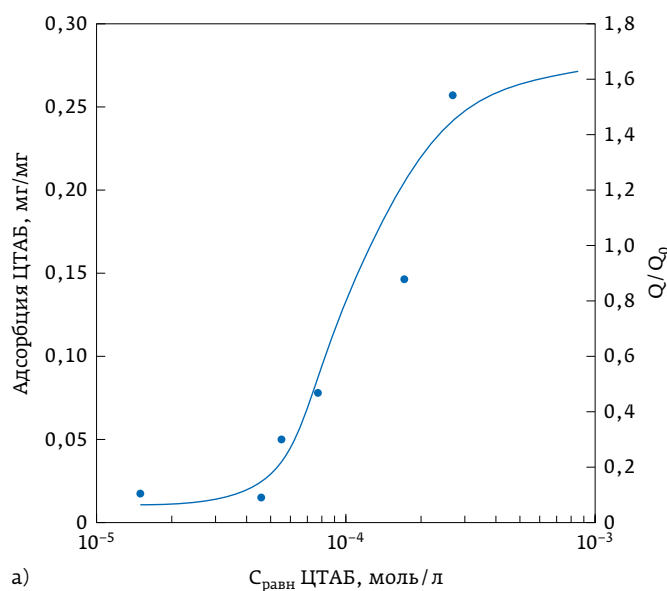


Рис. 2. Дифрактограмма Fe_3O_4 +МПК

ПАВ на минеральных поверхностях, а также с привлечением методов термогравиметрии, измерения электрокинетического потенциала, метода флуоресцентных зондов, атомно-силовой микроскопии и компьютерного моделирования взаимодействий «ПАВ – поверхность».

Изотермы сорбции ЦТАБ и ОК (рис. 4) позволили оценить степень заполнения поверхности носителя модификатором и, таким образом, выяснить, как влияют условия модифицированных частиц на физико-химические и сорбционные свойства полученного материала [5].



а)

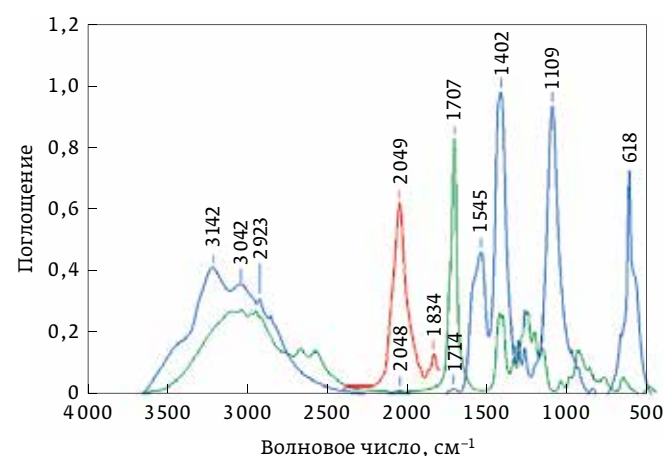
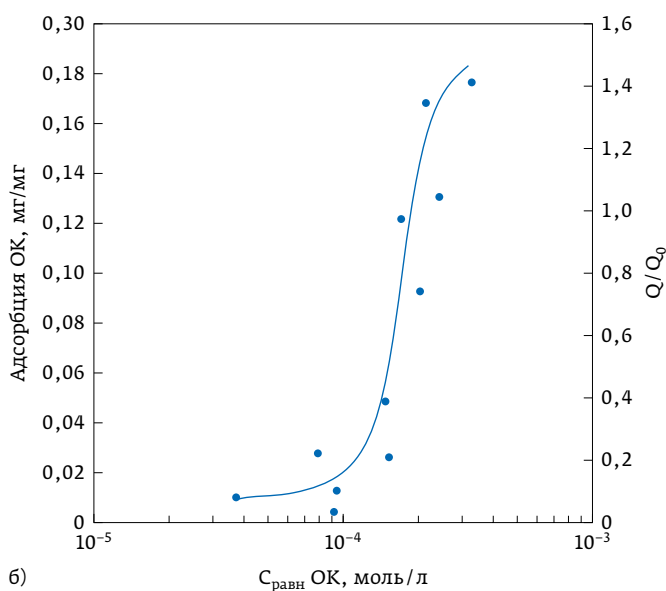


Рис. 3. Инфракрасные спектры Fe_3O_4 +ОК+МПК (синий), накопленный сигнал SH-группы (красный) и МПК (зеленый)

Наноразмерные сорбенты

Ахиллесовой пятой большинства аналитических схем является пробоподготовка – длительная и трудоемкая стадия анализа, обеспечивающая перевод аналита в форму, удобную для получения аналитического сигнала. На примере магнитных материалов рассмотрено, как можно усовершенствовать эту процедуру, применяя наноразмерные материалы и их сорбционные свойства.

Количество публикаций, посвященных анализу с использованием магнитных сорбентов, за последние 20 лет выросло в десятки раз. Выделение



б)

Рис. 4. Изотермы сорбции ЦТАБ (а) и ОК (б) на магнетите, полученные для различных условий

Таблица 1. Сорбционные характеристики некоторых наноразмерных материалов [6]

Сорбент	Коэффициент распределения K_d						
	Co	Cu	Ag	Cd	Hg	Pb	Tl
Активированный уголь	790	26 000	27 000	1 300	31 000	190 000	21
Fe ₃ O ₄ без оболочки	1 600	7 400	13 000	2 400	16 000	78 000	4 000
Тиоловая смола	890	6 300	16 000	1 500	10 000	41 000	2 200
Fe ₃ O ₄ @ меркаптомасляная кислота	20 000	440 000	27 000	20 000	7 800	1 800 000	6 400
Fe ₃ O ₄ @мезо-2,3-димеркапто-янтарная кислота	3 200	91 000	110 000	7 400	390 000	280 000	13 000
Fe ₃ O ₄ @н-глутатион	2 600	80 000	12 000	9 000	95 000	265 000	2 100
Fe ₃ O ₄ @α-тио-ω (пропионовая кислота) гепта(этиленгликоль)	26 000	400 000	86 000	37 000	330 000	1 200 000	12 000
Смола с этилендиамин-тетрауксусной кислотой	360 000	62 000	29 000	500 000	10 000	180 000	60
Fe ₃ O ₄ @этилендиамин-тетрауксусная кислота	10 000	15 000	150 000	320	300 000	200 000	6 800
Fe ₃ O ₄ @3-меркапто-пропионовая кислота	–	2 000 000	–	10 000	–	10 000 000	–

примесей из водных объектов оказалось достаточно популярным с точки зрения технологии и аналитики благодаря простоте и эффективности извлечения растворенных форм металлов из растворов и возможности синтеза и применения сорбентов с заданным строением сорбционного слоя, то есть с заданными свойствами.

В табл. 1 представлены сорбционные характеристики (коэффициенты распределения K_d) для магнитных материалов с оболочками различного строения при сорбции тяжелых металлов из речной воды, демонстрирующие перспективность применения таких материалов при решении экологических задач.

Зависимость степени извлечения Pb(II), Cu(II) и Cd(II) от V показывает, что количественная сорбция ионов тяжелых металлов в статических условиях достигается при больших объемах растворов, в то время как масса магнитных сорбентов составляет несколько десятков миллиграммов (рис. 5).

Помимо простоты получения, дешевизны, возможности количественного и быстрого извлечения целевых аналитов, эти сорбенты способствуют получению достаточно чистых элюатов, которые легко анализировать различными инструментальными методами, в том числе любыми атомно-спектральными.

Наиболее простым вариантом сорбционного концентрирования, приемлемым для рутинного анализа, остается статический вариант сорбции. Его недостаток состоит в том, что приходится отделять большие объемы растворов фильтрованием. В случае магнитных сорбентов эта проблема полностью исключается

применением магнитной сепарации, которая позволяет отделить концентрат от раствора с помощью небольшого магнита (рис. 6) и анализировать чистый раствор (элюат) любым инструментальным методом (ЭТААС, ИСП-АЭС, ИСП-МС). В случае ЭТААС можно обойтись и без элюирования, если анализировать твердый концентрат в виде суспензии.

Если возникают более сложные задачи (например, извлечение компонентов различной природы

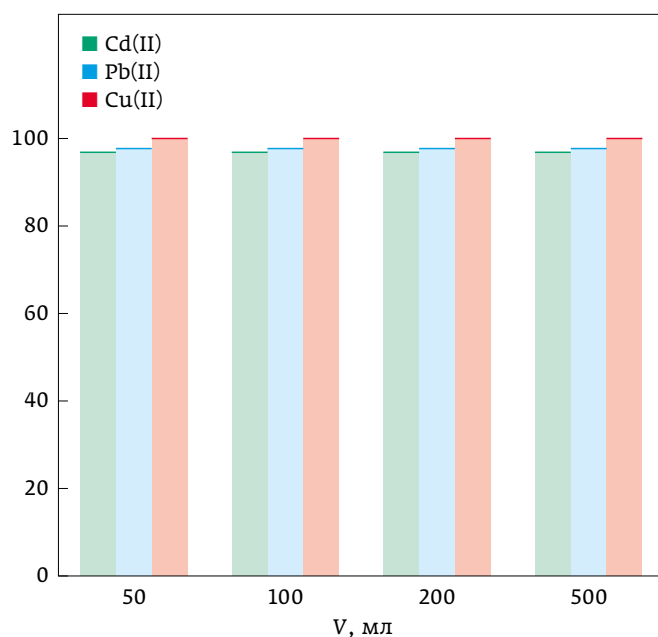


Рис. 5. Зависимость степени извлечения Pb(II), Cu(II) и Cd(II) от V

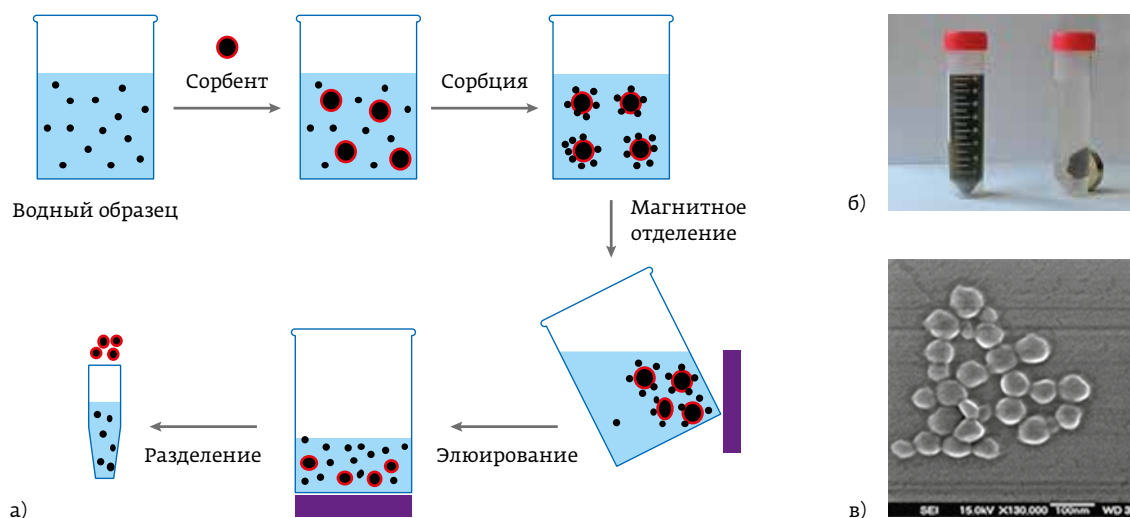


Рис. 6. Принцип действия магнитных сорбентов (а, б) и изображение материала $Fe_3O_4@TEOS@CTAB$ (в)

при решении экологических задач или выполнении нескольких функций в биомедицинских исследованиях), для их решения необходимо использовать более сложные, многокомпонентные (и многофункциональные) поверхностные структуры. Так, для одновременного сорбционного концентрирования экотоксикантов различной химической природы (фенолы и ионы тяжелых металлов) был получен и испытан магнитный наноматериал с силикагелевой мезопористой оболочкой [5]. Поры, заполненные мицеллами ЦТАБ, представляли собой «нанореакторы», в которых происходит экстракция органических экотоксикантов (фенолов), а основная часть оболочки, содержащая в структуре серосодержащие группы, служила сорбентом для неорганических загрязнителей (тяжелых металлов). Следует отметить, что высокая эффективность этих сорбентов была подтверждена исследованиями, выполненными для очень низких концентраций компонентов (ниже уровня ПДК).

Сказанное выше касалось концентрирования, то есть отделения аналитов и получения простых по составу растворов, которые удобно анализировать инструментальными, в первую очередь атомно-спектральными, методами. Помимо растворенных форм элементов, в анализе могут быть использованы и другие; наибольшее их разнообразие отмечается в методах, связанных с электротермическим испарением.

Наночастицы в методе генерации гидридов

Термин «генерация гидридов» достаточно условен. Речь идет о получении летучих форм элементов различного состава (гидридов, карбониллов, оксидов

и др.), применение которых расширяет круг определяемых таким способом элементов: это не только Se, As, Te, Pb и т. д., но и Fe, Co и Ni и т. д., благородные элементы (Ag, Au и Pt), а также некоторые неметаллы (C, S, Br, Cl и др.) [6].

Наночастицы диоксида титана участвуют в процессах фотоокисления оксидов мышьяка и селена с последующей генерацией гидридов, а также фотохимической генерации гидридов в присутствии низкомолекулярных органических кислот ($HCOOH$, CH_3COOH), образующих при УФ-облучении радикалы и затем летучие формы целого ряда элементов [8, 9]. Схема ячейки для фотохимической генерации летучих соединений приведена на рис. 7 [9].

Определение элементов в виде их летучих соединений позволяет получать рекордные пределы обнаружения для «трудных» элементов (нг/л при ИСП-МС определении с электротермической атомизацией (ETV ICPMS)).

Метод очень интересный, но в коммерческих приборах не реализован, и его перспективность не вполне ясна.

Наночастицы как матричные модификаторы в ЭТААС

При ЭТААС определении элементов, образующих при невысоких температурах летучие соединения (Hg, Se, As, Sb, Pb, Cd и др.), используют модификаторы матрицы, компоненты которых образуют термически устойчивые соединения с аналитами. Это повышает температуру термообработки и приводит к удалению матрицы при анализе высокосолевого раствора сложного состава.

Первая работа, посвященная применению для этих целей наночастиц (сопоставление

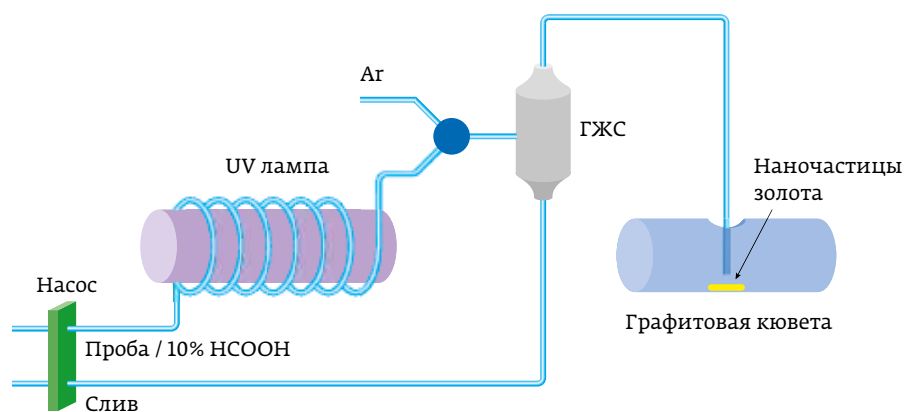


Рис. 7. Схема ячейки для фотохимической генерации летучих соединений

эффективности различных форм палладия при определении селена), была выполнена в 1996 году [10]. Позднее в качестве модифицирующих агентов использовали наночастицы золота, серебра, палладия и даже углеродные нанотрубки. Из приведенного рис. 8 следует, что присутствие наночастиц селена приводит к увеличению абсорбционного сигнала ртути на порядок по сравнению с сигналом в отсутствие модификатора [11]; более того, эти наночастицы «работают» даже лучше традиционного для ЭТААС палладиевого модификатора. Вероятно, все дело в различной устойчивости соединений ртути с палладием и селеном.

Наночастицы в методах медицинской диагностики и биоанализа

В биомедицинских приложениях наночастицы служат для решения очень разных задач. Их применяют для МРТ-визуализации, гипертермии, целевой доставки лекарств, подготовки к проведению ПЦР-тестов. Эти приложения предъявляют повышенные требования к частицам в отношении их токсичности и размеров, что учитывается при синтезе материалов нужного строения и состава.

Ниже приведена схема выделения нуклеиновых кислот из сыворотки крови для последующего ПЦР-анализа с силанизированными магнитными частицами (рис. 9). Такие частицы имеют достаточно простое строение «ядро – оболочка», разрабатываются и выпускаются несколькими нашими компаниями (например, «ДНК-технологии») и широко используются во многих лабораториях, применяющих молекулярно-генетические методы исследования.

Для более сложных приложений существуют более сложные структуры. В качестве примера можно привести магнитоуправляемые наносистемы для направленной доставки лекарств на основе частиц с многослойной оболочкой $Fe_3O_4@TEOS/MPTMS@Au@DOX$, содержащих доксорубин (DOX), как рН-зависимое действующее вещество и золото, как агент для гипертермии (рис. 10) [12]; другой пример – магнитосомы (липосомы с кремний-содержащей оболочкой, наполненные магнитными наночастицами) (рис. 11) [13, 14].

Структура магнитосом и вхождение магнитных частиц в полость везикул установлены методами ВЭЖХ, ДРС и АЭС-ИСП [14].

Однако целый ряд существенных проблем, обуславливающих возможность применения таких материалов, пока не решены.

Доставленные лекарства высвобождаются, вместе с ними высвобождаются и магнитные частицы. И необходимо отслеживать, что с ними происходит в организме: время циркулирования наночастиц,

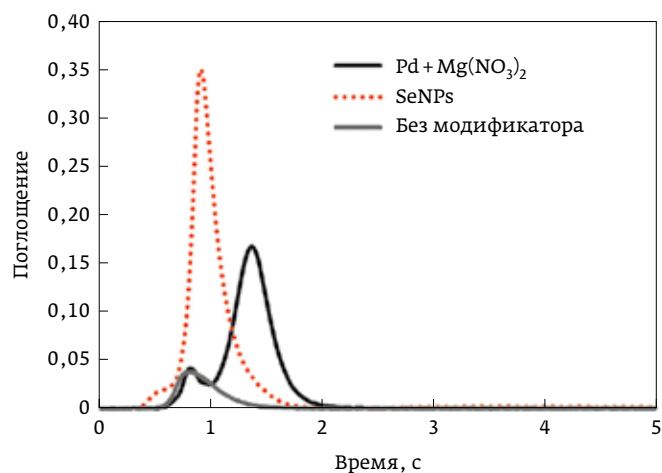


Рис. 8. Зависимость аналитического сигнала ртути в присутствии наночастиц селена, модифицированных додецилсульфатом. Аналитические сигналы ртути (400 мг/л) при температуре пиролиза 250 °С и температуре атомизации 1300 °С в отсутствие модификатора матрицы (серый) и в присутствии двух различных типов модификаторов: нитрата палладия (черный) и наночастиц селена (красный) [11]

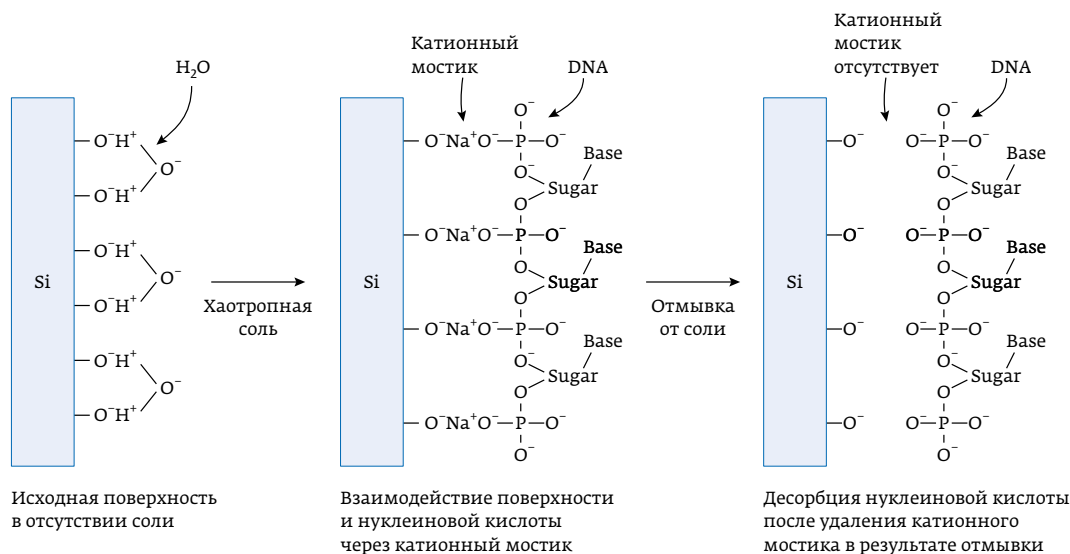
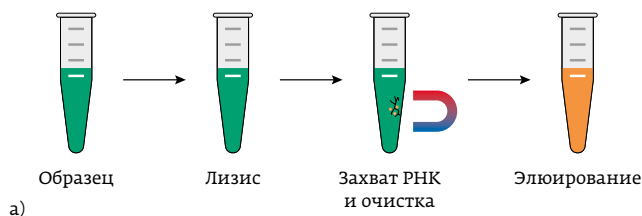


Рис. 9. Общая схема выделения нуклеиновых кислот (НК) (а). Взаимодействие НК с поверхностью силанизированных магнитных наночастиц (б)

их биораспределение на суборганном и клеточном уровнях, скорость деградации частиц, скорость выведения из организма, токсичность, модифицирование их биологически активными молекулами организма. Для проведения этих очень нужных и важных исследований необходима методическая база, которая обеспечит новые подходы к анализу сложных биологических сред, определению низких уровней содержания элементов, их растворенных и наноразмерных форм. Большую роль в таких исследованиях будут играть, несомненно, и современные атомно-спектральные методы.

Общее содержание элементов, входящих в состав наноматериалов, чаще всего определяют методами ИСП-МС или ЭТААС; это содержание можно пересчитать на число частиц. Гораздо информативнее масс-спектрометрия с индуктивно связанной

плазмой в режиме мониторинга единичных частиц (spICP-MS). Этот метод позволяет получить данные о концентрации частиц в единице объема анализируемого раствора и о распределении частиц по размерам (рис. 12), на основании чего можно судить об изменениях, происходящих с наночастицами при контакте с биологической средой: происходит ли растворение частиц, их агрегирование, накопление и какова скорость этих изменений [15].

Несмотря на очевидную перспективность метода spICP-MS, его развитие сдерживается, в частности, отсутствием стандартных образцов наночастиц и рядом инструментальных проблем, связанных с получением и обработкой данных. Подход, предложенный в 2003 году [16], пока находится в стадии развития [17, 18].

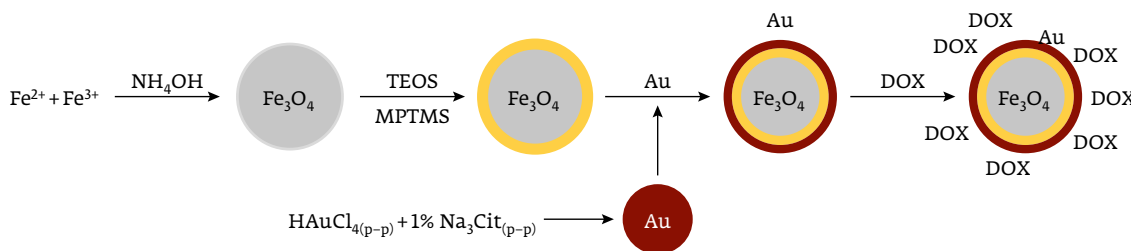


Рис. 10. Схема получения Fe₃O₄@TEOS/MPTMS@Au@DOX

СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ



производство: г. Новосибирск, ул. Мусы Джалиля, 3/1
Научно-производственная фирма «СИМЕКС»

ИК фурье-спектрометры ФТ: модели 801, 803 и 805
ИК микроскоп МИКРАН-2 и МИКРАН-3 с картированием
для регистрации спектров микрообъектов (от 5 мкм)

- большой набор приставок, в том числе со встроенной видеокамерой: МНПВО и НПВО с элементами из алмаза, селенида цинка и германия, зеркального и диффузного отражения с разными углами падения и положением образца; фокусирующие для работы с таблетками и объектами произвольной формы; приставки для работы с широкодиапазонным ИК оптоволокном, кюветы жидкостные и газовые, автосамплер на пропускание (20 окон), прессы мини, ручные и гидравлические;
- многофункциональное программное обеспечение.



Приставка «Карусель»
(автосамплер на 20 позиций)



Приставки для экспресс-анализа
твердых и жидких веществ:
НПВО с алмазом и регулируемый
жидкостной конденсор (РЖК)

Назначение: регистрация в ближней и средней ИК области спектров пропускания, отражения, двойного прохождения, одно- и многократного нарушенного полного внутреннего отражения твердых, жидких и газообразных веществ, с последующей идентификацией, а также для качественного и количественного анализа смесей, содержащих несколько компонентов.

Спектральный ИК комплекс применяется для неразрушающего экспресс-анализа объектов, в том числе неоднородных по составу: полимеров в виде частиц, пленок и волокон, лакокрасочных покрытий, наркотиков, взрывчатых веществ, материалов документов, горюче-смазочных материалов, фармакологических препаратов и **рекомендуется к использованию** в экспертно-криминалистических, судебно-медицинских и других подразделениях различных организаций: МВД, ЦЭКТУ, ФСБ, МЧС, РЖД, Минюста и Минздрава, в т.ч. в Центрах по сертификации и контролю качества лекарственных средств, в производственных, университетских и научно-исследовательских лабораториях.

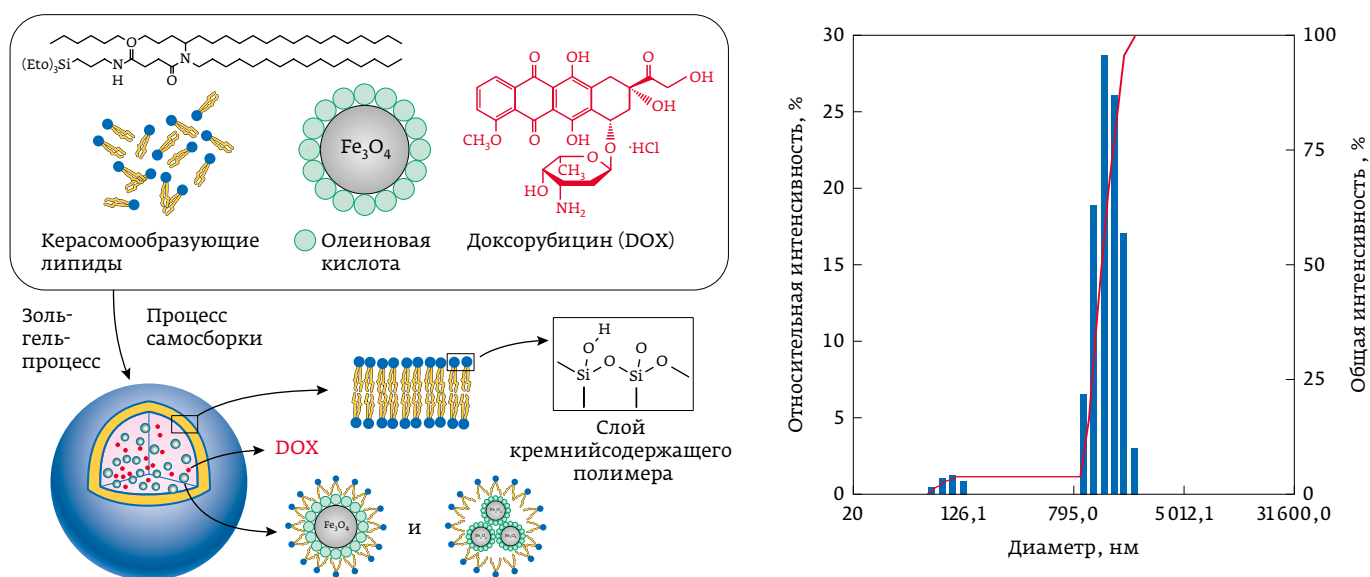


Рис. 11. Структура магнитосом [13] и гистограммы распределения по размерам свободных частиц (слева) и частиц, инкапсулированных в полость везикулы (справа). Красной линией показан усредненный размер свободных частиц и наночастиц в составе везикул [14]

Исследование состава, характеристик и поведения наноматериалов и отдельных наночастиц в окружающей среде

Широкое применение наноразмерных материалов в технологии и медицине привело к увеличению количества наноразмерных частиц, попадающих в биосистемы и другие объекты окружающей среды. В связи с этим растет актуальность как контроля состава выпускаемых наноматериалов (в частности, определение элементов-примесей в них для оценки биотоксичности), так и исследования поведения наночастиц и их дериватов в природных водных

средах. Определение элементов-примесей в наноматериалах подразумевает экстракцию искомым компонентов, полное разложение навески («сухое» и «мокрое») либо (при возможности) анализ суспензий с инструментальным окончанием (ААС, ИСП-АЭС, ИСП-МС).

Определение же фракции наночастиц в природных водных средах – гораздо более сложная задача, поскольку требуется отделить не только мешающие матричные компоненты, но и фракцию, содержащую искомые элементы в иных формах (ионные, комплексные и т. д.). Успешно осуществить такие определения возможно при сочетании современных инструментальных методов (ИСП-МС)

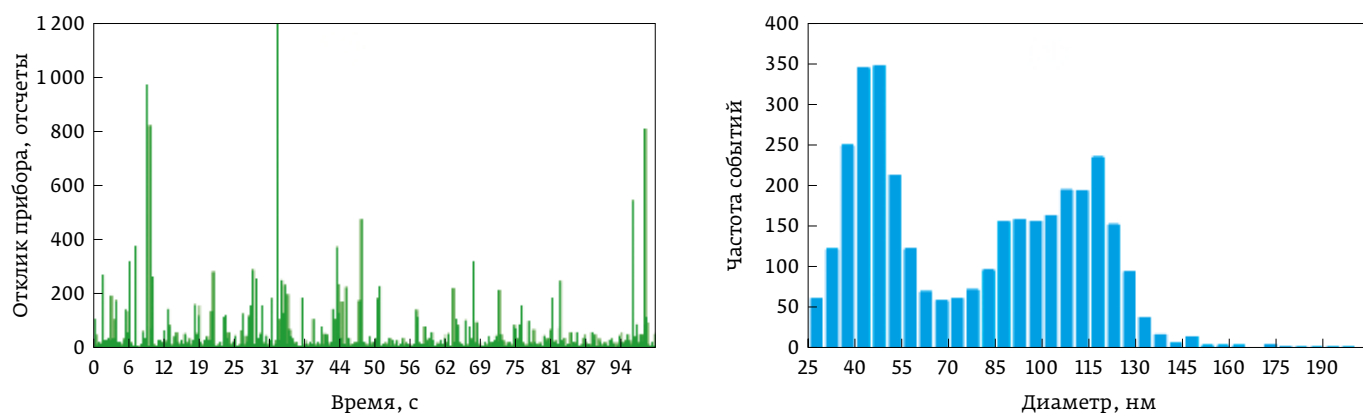


Рис. 12. Характер информации, получаемой методом spICP-MS: исходный спектр и распределение наночастиц по размерам [15]

ПРОДУМАННЫЕ РЕШЕНИЯ для аналитической лаборатории

Компания Лабконцепт – официальный дистрибьютор зарубежных и российских производителей аналитического и общелабораторного оборудования, мебели и расходных материалов, а также производитель оборудования для пробоподготовки и высокоточной весоизмерительной техники



- **Оснащение лабораторий аналитическим оборудованием, расходными материалами и мебелью.**
- **Быстрые сроки поставки.**
Широкая номенклатура товаров на собственном складе в Санкт-Петербурге
- **Собственное производство высокоточных весов и оборудования для пробоподготовки (полный производственный цикл).**
Сборочное производство хроматографического оборудования
- **Собственная аналитическая лаборатория.**
Оснащенная современным оборудованием, позволяющая проводить полное предпродажное тестирование приборов, оперативно работать с клиентскими и разрабатывать собственные методики, а также организовывать практическое обучение любой сложности
- **Возможности по доработке и адаптации приборов.**
В том числе приборов сторонних производителей под специализированные задачи заказчиков



☎ 8 (812) 327-37-00

✉ lc@labconcept.ru

🌐 labconcept.ru

Санкт-Петербург, Москва, Казань,
Нижний Новгород, Уфа

с эффективным разделением различных форм элементов в потоке (ВЭЖХ, проточное фракционирование в силовом поле, капиллярный электрофорез) [19–21]. Для разделения молекулярных и наноразмерных форм в растворах также перспективно применение упоминавшегося выше метода ИСП-МС в режиме мониторинга единичных частиц (spICP-MS) [22].

Заключение

Все рассмотренные в статье перспективные области нанохимии, в развитии которых значительна роль аналитической химии и аналитических инструментальных методов, актуальны и интенсивно исследуются. К ним относятся, в первую очередь, усовершенствование методов получения наноразмерных структур (для большей монодисперсности полученных материалов и однородности их свойств); создание многофункциональных наночастиц; развитие инструментальных методов исследования и характеристики наночастиц; выделение следовых количеств наноразмерных аналитов из сред сложного состава; исследование поведения наночастиц в биологических системах. Это относительно новые области нанонауки, существующие на стыке нескольких, как казалось бы еще недавно, совершенно разных направлений. Для каждого из них есть явная потребность в дальнейшем развитии, для чего необходимы совместные усилия ученых, формирующих картину наномира.

Литература/References

1. Кубракова И. В., Пряжников Д. В. Микроволновый синтез наноразмерных магнитных сорбентов. *Журнал аналитической химии*. 2021. 76(1):20.
Kubrakova I. V., Pryazhnikov D. V. Microwave-assisted synthesis of nanosized magnetic adsorbents. *Journal of Analytical Chemistry*. 2021. 76(1):15.
2. Пряжников Д. В., Кубракова И. В. Магнитные наноразмерные материалы с модифицированной поверхностью: получение и исследование структуры, состава и свойств. *Журнал аналитической химии*. 2021. 76(6):496.
Pryazhnikov D. V., Kubrakova I. V. Surface-modified magnetic nanoscale materials: preparation and study of their structure, composition, and properties. *Journal of Analytical Chemistry*. 2021. 76(6):685.
3. Pryazhnikov D. V., Kubrakova I. V., Kiseleva M. S. et al. Preparation and structural characterization of nanosized magnetic solid-phase extractants. *Mendeleev Commun.* 2014. 24(2):130.
4. Warner C. L., Addleman R. Sh., Cinson A. D., Droubay T. C., Engelhard M. H., Nash M. A., Yantasee W., Warner M. G. High-Performance, Superparamagnetic, Nanoparticle Based Heavy Metal Sorbents for Removal of Contaminants from Natural Waters. *ChemSusChem*. 2010. 3:749.
Kiseleva M. S., Pryazhnikov D. V., Kubrakova I. V. Магнитный сорбент с мезопористой оболочкой для одновременного концентрирования экотоксикантов различной природы. *Журнал аналитической химии*. 2018. 73(1):14–21.
5. Kiseleva M. S., Pryazhnikov D. V., Kubrakova I. V. Magnetic sorbent with a mesoporous shell for the simultaneous preconcentration of ecotoxicants of different nature. *Journal of Analytical Chemistry*. 2018. 73(1):10.
6. Zou Z., Hu J., Xu F., Hou X., Jiang X. Nanomaterials for photochemical vapor generation-analytical atomic spectrometry. *Trends in Analytical Chemistry*. 2019. 114:242.
7. Sturgeon R. E. and Grinberg P. Some speculations on the mechanisms of photochemical vapor generation. *J. Anal. At. Spectrom.* 2012. 27:222.
8. Zou Z., Jiang X., Li L., Yao Q., Luo H., Huang K. Photochemical vapor generation of selenium: Mechanisms and applications. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 2020. 27.
9. He C., Cheng G., Zheng C., Wu L., Lee Y., Hou X. Photochemical vapor generation and in situ preconcentration for determination of mercury by graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Anal. Methods*. 2015. 7:3015.
10. Volynsky A. B., Krivan V. Comparison of various forms of palladium used as chemical modifiers for the determination of selenium by electrothermal atomic absorption spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 1996. 11:159.
11. Zangmo T., Siripinyanond A. Exploring the applicability of nano-selenium for capture of mercury vapor: Paper based sorbent and a chemical modifier in graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Analyt. Chim. Acta*. 2019. 1085.
12. Пряжников Д. В., Ефанова О. О., Киселева М. С., Кубракова И. В. Микроволновый синтез наноразмерных материалов «ядро – оболочка» на основе магнетита, функционализированного золотом и доxorубицином. *Российские нанотехнологии*. 2017. 12(3–4):69–75.
Pryazhnikov D. V., Efanova O. O., Kiseleva M. S., Kubrakova I. V. Microwave synthesis of core-shell nanosize materials on the basis of magnetite functionalized with gold and doxorubicine. *Nanotechnologies in Russia*. 2017. 12(3–4):199.
13. Cao Z., Yue X., Li X., Dai Z. Stabilized Magnetic Cerasomes for Drug Delivery. *Langmuir*. 2013. 29:14976–14983.
14. Pryazhnikov D. V., Efanova O. O., Kubrakova I. V. Cerasomes containing magnetic nanoparticles: synthesis and gel-filtration chromatographic characterization. *Mendeleev Commun.* 2019. 29(2):226.
15. Dan Y., Zhang W., Xue R., Ma X., Stephan C., Shi H. Characterization of gold nanoparticle uptake by tomato plants using enzymatic extraction followed by single-particle inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis. *Environ. Sci. Technol.* 2015. 49(5):3007.
16. Degueldre C., Favarger P.-Y. Colloid analysis by single particle inductively coupled plasma-mass spectroscopy: a feasibility study. *Colloids Surf. A*. 2003. 217:137.
17. Laborda F., Bolea E., Jiménez-Lamana J. Single particle inductively coupled plasma mass spectrometry for the analysis of inorganic engineered nanoparticles in environmental samples. *Trends Environ. Anal. Chem.* 2016. 9:15.
18. Temerdashev Z. A., Galitskaya O. A., Bolshov M. A. A novel method for the background signal correction in SP-ISP-MS analysis of the sizes of titanium dioxide nanoparticles in cosmetic samples. *Molecules*. 2022. 27. 7748.
19. Тимербаев А. Р. Роль масс-спектрометрии в разработке и внедрении в медицину металлсодержащих наночастиц. *Журнал аналитической химии*. 2015. 70(9):899–915.
Timerbaev A. R. Role of mass spectrometry in the development and medicinal implementation of metal-based nanoparticles. *Journal of Analytical Chemistry*. 2015. 70(9):1031.
20. Pitkänen L., Striegel A. M. Size-exclusion chromatography of metal nanoparticles and quantum dots. *Trends Analyt. Chem.* 2016. 80:311.
21. Катасонова О. Н., Федотов П. С. Методы проточного фракционирования микрочастиц: перспективы и области применения. *Журнал аналитической химии*. 2009. 64(3):228–242.
Katonova O. N., Fedotov P. S. Methods for continuous flow fractionation of microparticles: Outlooks and fields of application. *Journal of Analytical Chemistry*. 2009. 64(3):212.
22. Mozhayeva D., Engelhard C. A critical review of single particle inductively coupled plasma mass spectrometry – A step towards an ideal method for nanomaterial characterization. *J. Anal. At. Spectrom.* 2020. 35: 1740–1783.

Статья поступила в редакцию 25.02.2023

Принята к публикации 14.03.2023

Гранд-ИСП

атомно-эмиссионный
спектрометр с аргоновой
индуктивно-связанной
плазмой

- Спектрометр с двойным обзором плазмы позволяет одновременно регистрировать любые спектральные линии с высоким разрешением в диапазоне концентраций от долей ppm до десятков процентов и предлагает широкий набор опций для решения любых исследовательских задач.
- Разные варианты исполнения – с вакуумной и воздушной оптикой

- Предназначен для анализа водных растворов – экологических, геологических, металлургических, высококачественных материалов, керамики а также органических веществ и др.
- Система регистрации спектров – анализаторы МАЭС.
- Малое потребление аргона.
- Удобен в использовании.



Спектрометр «Гранд-ИСП» является комплексом атомно-эмиссионного спектрального анализа с анализатором МАЭС зарегистрированным в:

- Госреестре средств измерений Российской Федерации под № 33011-11;
- Реестре государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан за № KZ.02.03.07668-2017/33011-11;
- Госреестре средств измерений Республики Узбекистан под № 02.3722-18.

СДЕЛАНО В РОССИИ

ООО «ВМК-Оптоэлектроника» – российский разработчик и производитель аналитического оборудования с 1991 года.



630090, Россия, Новосибирск, прт Ак. Коптюга, 1
Тел./факс: 8 (800) 333-30-91 Звонок по России бесплатный,
8 (383) 330-22-52, www.vmk.ru, info@vmk.ru

