

## Наиболее значимые статьи по методу атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой.

### Библиографический указатель

**\*А.А. Пупышев, Н.Л. Васильева**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Российская Федерация, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

\*Адрес для переписки: Пупышев Александр Алексеевич, E-mail: pupyshev@gmail.com

Поступила в редакцию 27 августа 2024 г., после доработки – 15 ноября 2024 г.

Составлен библиографический указатель наиболее значимых статей по созданию, развитию и применению современного аналитического метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Временной диапазон публикаций охватывает период от разработки первых мощных генераторов индуктивно связанной плазмы по настоящее время. В указателе приведены представляющие особый интерес для научной и практической работы публикации авторов различных стран. Каждую публикацию сопровождает ее полное библиографическое описание и краткая аннотация. Для всех статей в указателе приведены электронные адреса или идентификаторы, позволяющие легко и быстро найти публикации в сети Интернет. Указатель предназначен для научной и практической деятельности аналитиков, специализирующихся в области атомного спектрального анализа.

**Ключевые слова:** индуктивно связанная плазма, устройства ввода проб, плазменные горелки, механизм возбуждения спектральных линий, матричные спектральные и неспектральные помехи, внутренний стандарт, градуировка, таблицы спектральных линий, аналитические характеристики.

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2024, vol. 28, no. 4, pp. 394 - 410

DOI: 10.15826/analitika. 2024.28.4.005

## The most important articles on the method of atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma.

### Bibliographic index

**\*Alexander A. Pupyshev, Nataliya L. Vasil'eva**

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
19 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

\*Corresponding author: Aleksandr A. Pupyshev, E-mail: pupyshev@gmail.com

Submitted 27 August 2024, received in revised form 15 November 2024

A bibliographic index of the most significant articles on the creation, development and application of the modern analytical method of atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma has been compiled. The time range of publications covers the period from the creation of the first powerful generators of inductively coupled plasma to the present. The index presents the most significant publications for scientific and practical work by authors from different countries. For each publication, a full bibliographic description and a brief abstract are provided. Most articles in the index are accompanied by e-mail addresses or identifiers that allow them to be easily and quickly found on the Internet. The index is intended for scientific and practical activities of analysts specializing in the field of atomic spectral analysis.

**Keywords:** inductively coupled plasma, sample inlet devices, plasma torches, spectral line excitation mechanism, matrix spectral and non-spectral interference, internal standard, calibration, spectral line tables, analytical characteristics

## ВВЕДЕНИЕ

В статье приведен библиографический указатель публикаций по созданию, развитию и становлению метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (**АЭС-ИСП**), как мощного современного метода многоэлементного анализа. Временной диапазон указателя охватывает публикации от момента разработки и создания мощных высокочастотных генераторов индуктивно связанной плазмы (**ИСП**), пригодных для возбуждения атомных и ионных спектров большинства элементов Периодической системы, до настоящего времени. В указателе представлены наиболее значимые, по мнению авторов указателя, публикации, полезные для практической и научной работы в области АЭС-ИСП, выполненные в различных странах. Для каждой публикации приведены полное библиографическое описание и ее краткая аннотация. Все статьи в указателе сопровождаются идентификаторами, позволяющими легко и быстро найти их в сети Интернет.

Публикации в указателе приведены последовательно по годам издания и имеют сквозную нумерацию [1-102], необходимую для быстрого поиска статей в тексте указателя. Для облегчения поиска

необходимой информации среди этих публикаций можно также выделить некоторые специфические направления:

- обзорная информация по методу АЭС-ИСП – 7, 8, 17-20, 25, 28, 51, 61, 66, 69, 73, 74, 94, 99;
- физические процессы в ИСП – 2, 4, 6, 8, 12, 26, 36, 38, 41, 43, 47, 49, 56, 57, 59, 70, 77, 86, 90, 91, 93, 102;
- аппаратура метода АЭС-ИСП – 1-3, 5, 9, 15, 21, 34, 67, 99;
- ввод образцов в плазменный источник 8, 10, 11, 43, 46, 64, 65, 69, 78, 80, 82, 89, 92, 97;
- таблицы спектральных линий – 23, 27, 30-33, 35, 37, 40, 48, 52, 53, 68, 75;
- спектральные помехи 29, 42, 44, 50, 56, 60, 97, 101;
- выбор операционных параметров анализа – 13, 39, 62, 76, 81;
- аксиальное наблюдение спектра ИСП - 45, 74, 77, 81, 83-85;
- матричные неспектральные помехи – 14, 16, 46, 71, 72, 79, 81, 86, 88, 92, 96, 102;
- градуировка – 77, 87, 97, 98, 100;
- внутренний стандарт – 71, 97;
- аналитические характеристики АЭС-ИСП – 24, 35, 54, 55, 59, 60;
- анализ конкретных объектов – 22, 58, 63, 69, 95, 97.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

### 1942

1. Бабат Г.И. Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ними вопросы // Вестник электропромышленности. 1942. № 2. С. 1-12; 1942. № 3. С. 2-8.

Работа, заложившая основу для современных экспериментальных исследований в области мощной ИСП: первые конструкции генераторов и горелок, наблюдение и применение высокочастотных безэлектродных разрядов.

### 1947

2. Babat G.I. Electrodeless discharges and some allied problems // J. of the institute of electrical engineers (London). 1947. V. 94. P. 27-37.

<https://doi.org/10.1049/ji-3-2.1947.0005>

Конструкции ламповых высокочастотных генераторов, безэлектродные высокочастотные ( $10^6$ - $10^7$  Гц) индукционные (Н-вид) и емкостные (Е-вид) разряды в воздухе и исследование их характеристик, влияние аэродинамических характеристик потока газа на устойчивость разрядов, обнаружение эффекта контракции плазменного потока при повышении давления (сжатие плазмы и ее отход от стенок разрядной трубки).

### 1948

3. Бабат Г.И. Развитие техники высокой частоты // Электричество. 1948. № 12. С. 6-17.

Рассмотрены методы генерирования токов высоких и сверхвысоких частот, современные типы генераторных электровакуумных приборов, достижимые мощности и к.п.д., возможности применения высокочастотных токов.

### 1961

4. Reed T.B. Induction coupled plasma torch // J. of appl. phys. 1961. V. 32. P. 821-824.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.1736112>

Описан метод генерации стабильной плазмы при атмосферном давлении (гелий, водород, кислород, воздух и их смеси) с помощью высокочастотной (несколько МГц) индуктивной связи. Выполнено измерение температурного профиля ИСП при различных условиях потока и состава газа, разных уровнях мощности, вкладываемой в разряд. Достигнуты пиковые температуры 14000-19000 К. Обсуждена степень достижения локального термического равновесия (**ЛТР**) в плазме.

5. Reed T.B. Growth of refractory crystals using the induction plasma torch // *J. of appl. phys.* 1961. V. 32. P. 2534-2535.

<https://doi.org/10.1063/1.1728345>

Описано получение тугоплавких кристаллов с использованием трехпотоковой (три концентрических кварцевых трубки с различными потоками газа, в том числе с тангенциальным введением) индукционной плазменной горелки.

### 1963

6. Mavrodineanu R., Hughes R.C. Excitation in radio-frequency discharges // *Spectrochim. acta. Part B.* 1963. V. 19. P. 1309-1317.

[https://doi.org/10.1016/0371-1951\(63\)80240-4](https://doi.org/10.1016/0371-1951(63)80240-4)

Изучена возможность использования высокочастотных (30 МГц и 2450 МГц) разрядов, подобных по геометрии пламенам, в качестве источника возбуждения для атомной спектроскопии. Изучены спектры, наблюдаемые в диапазоне 200-1000 нм в атмосфере воздуха, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, He и H<sub>2</sub>. Большая температура электронов позволяет возбуждать спектр частиц, требующих высоких энергий возбуждения. Описаны способы введения твердых и жидких образцов в разряд. Получены спектры 75 элементов. Приведен пример количественного элементного анализа припоев.

### 1964

7. Greenfield S., Jones I.L., Berry C.T. High-pressure plasmas as spectroscopic emission sources // *Analyst.* 1964. V. 89. P. 713-720.

<https://doi.org/10.1039/AN9648900713>

Изложены работы авторов по созданию при атмосферном давлении плазмы, пригодной для атомно-эмиссионного спектрального анализа: спектральный источник с дугой постоянного тока и высокочастотный безэлектродный индукционный разряд, имеющий низкое фоновое излучение. Приведены таблицы относительных пределов обнаружения для некоторых металлических элементов.

8. Mavrodineanu R., Hughes R.C. The RF discharge at atmospheric pressure and its use as an excitation source in analytical spectroscopy // *Developments in applied spectroscopy. Proceedings of the fourteenth annual Mid-America spectroscopy symposium held in Chicago, Illinois, May 20-23, 1963.* Eds. J.E. Forrette, E. Lanterman. Chicago: Chicago section of the society for applied spectroscopy, 1964. P. 305-333

[https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8688-9\\_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8688-9_25)

Рассмотрена история применения высокочастотных полей для возбуждения атомных спектров. Выполнен обзор последних работ с разрядами с частотой 30 и 2450 МГц. Из нескольких изученных рабочих газов (воздух, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He и H<sub>2</sub>) для дальнейших исследований выбраны He и H<sub>2</sub> из-за относительно пониженного спектрального фона плазмы, способности возбуждать различные атомные и ионные частицы. Зарегистрированы спектры ~70 элементов. Разряды обладают высокой энергией электронов и сравнительно низкой тепловой энергией. Обсуждены процедуры ввода твердых, жидких и газообразных проб в разряды и их применение для аналитических целей.

### 1965

9. Wendt R.H., Fassel V.A. Induction-coupled plasma spectrometric excitation source // *Anal. chem.* 1965. V. 37. P. 920-922.

<https://doi.org/10.1021/ac60226a003>

Приведена конструкция горелки (трехпотоковая аргоновая, диаметром 18 мм) индукционной (27-50 МГц, 1.0-2.5 кВт) плазмы с вводом аэрозоля пробы с помощью ультразвукового распылителя. Найдены типичные пределы обнаружения группы элементов в водных растворах. Сделан вывод, что такое сочетание генераторов плазмы и аэрозоля является практичным и универсальным спектральным источником для аналитической спектроскопии.

### 1969

10. Dickinson G.W., Fassel V.A. Emission spectrometric detection of the elements at the nanogram per milliliter level using induction-coupled plasma excitation // *Anal. chem.* 1969. V. 41. P. 1021-1024.

<https://doi.org/10.1021/ac60277a028>

Показана возможность резкого улучшения пределов обнаружения элементов в растворах за счет предварительной десольватации аэрозоля пробы, оптимизации геометрической формы плазмы в горелке, подстройки нагрузки плазмы с высокочастотным генератором. Пределы обнаружения исследованных элементов (включая Se, Ta, Th, U, Zr и Hf) снижены до уровня нг/мл и долей мкг/мл.

### 1972

11. Boumans P.W.J.M., De Boer F.J. Studies of flame and plasma torch emission for simultaneous multi-element analysis. Preliminary investigation // *Spectrochim. acta. Part B.* 1972. V. 27. P. 391-414.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(72\)80038-7](https://doi.org/10.1016/0584-8547(72)80038-7)

Изучено использование для следового атомно-эмиссионного анализа высокотемпературного пламени и аргоновой ИСП (62 МГц, 2 кВт) с ультразвуковым вводом проб. При многоэлементном анализе достигнуты пределы обнаружения менее нг/мл.

### 1974

12. Sharp B.L. High-frequency electrodeless plasma spectrometry // *Sel. annu. rev. anal.* 1974. V. 4. P. 37-71.

<https://doi.org/10.1039/AS9740400037>

Рассмотрены классификация типов плазм, общие вопросы атомно-эмиссионной спектроскопии, термодинамическое равновесие в плазме, образование атомов и молекул в плазме разрядов, высокочастотные плазмотроны с индукционной связью, механизмы разрядов и их температура, изучение и применение микроволновой плазмы.

### 1975

13. Boumans P.W.J.M., De Boer F.J. Studies of an inductively-coupled high-frequency argon plasma for optical emission spectrometry-II. Compromise conditions for simultaneous multielement analysis // *Spectrochim. acta. Part B.* 1975. V. 30. P. 309-334.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(75\)80030-9](https://doi.org/10.1016/0584-8547(75)80030-9)

В статье рассмотрен экспериментальный выбор условий, при которых маломощная ИСП может быть использована для одновременного многоэлементного анализа. При мощности 0.7 кВт, потоке газа-носителя 1.3 л/мин аргона и использовании ультразвукового распыления растворов проб были достигнуты пределы обнаружения ниже 1 нг/мл для 27 из 32 изученных элементов и удовлетворительное подавление ионизационных помех. Классифицированы возможные межэлементные помехи в ИСП. Сделаны общие выводы относительно полезности метода АЭС-ИСП для проведения точных определений и выполнения многоэлементных анализов.

### 1976

14. Abdallah M.H., Mermert J.M., Trassy C. Etude spectrometrique d'un plasma induit par haute frequence. II. Differents types d'effets interelements observes // *Anal. chim. acta.* 1976. V. 87. P. 329-339. (на французском языке)

[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)82262-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)82262-5)

Исследованы различные типы помех, возникающие в методе АЭС-ИСП на разных стадиях

преобразования компонентов пробы в аналитический сигнал, и обсуждены способы их устранения.

15. Брицке М.Э., Сукач Ю.С., Филимонов Л.Н. Индукционный ВЧ-разряд и его применение в спектральном анализе // *Ж. приклад. спектроскоп.* 1976. Т. 25. № 1. С. 5-11.

Предложен водоохлаждаемый широкотрубный (внутренний диаметр горелки 38-40 мм) двухпоточный (транспортирующий и плазмообразующий потоки газа) индукционный разряд (40.68 МГц, 2-2.5 кВт). Изучены физические характеристики разряда.

16. Boumans P.W.J.M., De Boer F.J. Studies of an inductively-coupled high-frequency argon plasma for optical emission spectrometry-III. Interference effects under compromise conditions for simultaneous multi-element analysis // *Spectrochim. acta. Part B.* 1976. V. 31. P. 355-375.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(76\)80036-5](https://doi.org/10.1016/0584-8547(76)80036-5)

Рассмотрено проявление матричных несpectральных помех в ИСП (0.7 кВт, 50 МГц), снабженной ультразвуковым распылителем и десольвататором, в компромиссных для многоэлементного анализа условиях. Выделено влияние эффектов при распылении и десольватации, процессов в плазме на сигнал аналитов. Эффекты десольватации связаны с разницей в летучести между матрицей и аналитом. Эксперименты выявили плазменные эффекты, которые нельзя связать с общепринятыми ионизационными помехами, неполным испарением аэрозоля или диссоциацией частиц.

17. Greenfield S., McGeachin H.McD., Smith P.B. Plasma emission sources in analytical spectroscopy-III // *Talanta.* 1976. V. 23. P. 1-14.

[https://doi.org/10.1016/0039-9140\(76\)80002-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(76)80002-1)

Описана конструкция трехпоточковой азотно-аргоновой плазменной горелки (плазмообразующий поток – азот, 20-70 л/мин) при мощности высокочастотного генератора 2-7 кВт. Обсуждены вопросы разработки и свойств спектральных источников с ИСП, их применение в спектроскопическом анализе. Проведено сравнение с дуговыми, емкостными и микроволновыми спектральными плазменными источниками.

### 1977

18. Fassel V.A. Current and potential applications of inductively coupled plasma (ICP) - atomic emission spectroscopy (AES) in the exploration, mining,

and processing of materials // *Pure & appl. chem.* 1977. V. 49. P. 1533-1545.

<https://doi.org/10.1351/pac197749101533>

Рассмотрены достижения за последние десять лет развития ИСП (испарение, атомизация, возбуждение) для атомно-эмиссионного спектрального анализа. Данный спектральный источник позволяет определять все металлы, металлоиды, благородные газы и водород от ультраследового до матричного уровня. Возможен последовательный или одновременный многоэлементный анализ при едином наборе операционных условий измерений. Обсуждены применимость метода к анализу микролитровых или микрограммовых проб, межэлементные эффекты, возможность прямого анализа жидкостей, твердых тел и газов, стоимость, точность, прецизионность и динамический диапазон определяемых концентраций элементов.

## 1978

19. Barnes R.M., Boumans P.W.J.M. Recent advances in emission spectroscopy: inductively coupled plasma discharges for spectrochemical analysis // *Crit. rev. in analyt. chem.* 1978. V. 7. P. 203-296.

<https://doi.org/10.1080/10408347808542702>

Обсуждены достигнутые аналитические характеристики метода АЭС-ИСП (стабильность, воспроизводимость и точность, вид градуировочной функции и динамический диапазон, пределы обнаружения, возможность одновременного многоэлементного анализа), инструментарий (системы АЭС-ИСП, коммерческие и специальные приборы, характеристики и типы высокочастотных генераторов, индукторы, согласование нагрузки), плазменные горелки (конструкции, состав и потоки газа, ввод жидкостей, твердых веществ и газов), спектрометрические системы (оптика, одноканальные и многоканальные спектрометры, детекторы и системы обработки сигналов), характеристики разряда и их диагностика, изучение матричных спектральных и неспектральных помех, модельные представления ИСП.

20. Fassel V.A. Quantitative elemental analyses by plasma emission spectroscopy. Atomic spectra excited in inductively coupled plasmas are used for simultaneous multielement analyses // *Science.* 1978. V. 202. P. 183-191.

<https://doi.org/10.1126/science.202.4364.183>

Аргонная ИСП, работающая при атмосферном давлении, является очень хорошим спектральным источником для аналитической атомной эмиссионной спектроскопии. С использованием полихроматора АЭС-ИСП может использоваться для одновременного определения ультраследовых, следовых,

сопутствующих и матричных элементов в пробах, программируемые сканирующие спектрометры – для последовательных определений. Процесс атомизации-возбуждения в значительной степени свободен от межэлементных помех, предел обнаружения для большинства элементов находится в диапазоне ppb, а требования к подготовке образцов перед анализом часто минимальны.

21. Boumans P.W.J.M., Boer de F.J., Witmer A.W., Bosveld M. Outline of a method for spectrographic general survey analysis using liquid sampling and an inductively coupled plasma // *Spectrochim. acta. Part B.* 1978. V. 33. P. 535-544.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(78\)80060-3](https://doi.org/10.1016/0584-8547(78)80060-3)

Описано создание приборной системы для количественного спектрографического анализа жидкостей и твердых веществ с использованием аргонной ИСП и компьютеризированного автоматического микрофотометра для оценки фотографически зарегистрированных спектров. Приведена схема регистрации, позволяющая охватить фотографическим детектированием динамический диапазон  $10^5$  для одной спектральной линии. Выполнено сравнение достигнутых с ИСП и медной дугой NBS чувствительностей спектральных линий элементов.

22. Barnes R.M. Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy in air and water pollution analysis // *Toxicol. & environment. chem. rev.* 1978. V. 2. № 3. P. 187-208.

<https://doi.org/10.1080/02772247809356925>

Рассмотрены возможности и ограничения метода ИСП-АЭС для определения загрязнений в воздухе и воде.

## 1979

23. Wingle R.K., Peterson V.J., Fassel V.A. Inductively coupled plasma – atomic emission spectroscopy: prominent lines // *Appl. spectrosc.* 1979. V. 33. P. 206-219.

<https://doi.org/10.1366/0003702794925895>

Приведены наиболее сильные спектральные линии 70 элементов, излучаемые в ИСП (по элементам и по длинам волн). Для каждой спектральной линии оценены пределы обнаружения элементов.

24. Boumans P.W.J.M., Bosveld M. A tentative listing of the sensitivities and detection limits of the most sensitive ICP lines as derived from the fitting of experimental data for an argon ICP to the intensities tabulated for the NBS copper arc // *Spectrochim. acta. Part B.* 1979. V. 34. P. 59-72.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(79\)80023-3](https://doi.org/10.1016/0584-8547(79)80023-3)

Интенсивности спектральных линий, приведенные в таблицах для медной дуги NBS USA (Национальное бюро стандартов США), можно преобразовать в относительную чувствительность определения элементов в ИСП. Рассчитана чувствительность в ИСП 453 спектральных линий 71 элемента и оценены пределы обнаружения для спектральных линий в диапазоне от 230 до 680 нм.

25. Boumans P.W.J.M. Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy: its present and future position in analytical chemistry // *Fresenius Z. anal. chem.* 1979. В. 299. Р. 337-361.

<https://doi.org/10.1007/BF00704968>

Рассматривается метод АЭС-ИСП, как относительно новый метод анализа жидкостей и растворенных твердых веществ: принцип метода и основное оборудование, различие между мало- и мощными аргоновыми плазмами, жизнеспособность азот-аргоновых ИСП, пределы обнаружения элементов, воспроизводимость и точность анализа, динамический диапазон градуировочных графиков, анализ реальных образцов.

## 1980

26. Greenfield S., Burns D.T. Comparison of argon-cooled and nitrogen-cooled plasma torches under optimized conditions based on the concept of intrinsic merit // *Anal. chim. acta.* 1980. V. 113. P. 205-220.

[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)93734-1](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)93734-1)

Проведено сравнение систем ИСП с аргоном и азотом при оптимизированных условиях анализа. Обнаруженные различия позволяют предположить, что режим возбуждения может быть различным в аргон- и азотсодержащих системах.

27. Fry R.C., Northway S.J., Brown R.M., Hughes S.K. Atomic fluorine spectra in the argon inductively coupled plasma // *Anal. chem.* 1980. V. 52. P. 1716-1722.

<https://doi.org/10.1021/ac50061a042>

Приведена таблица относительных интенсивностей и длин волн возбужденных нерезонансных линий атомов фтора в спектральной области от 350 до 895 нм. Количественный отклик интенсивности линий фтора не зависит от его молекулярных видов, но пропорционален содержанию фтора в соединениях. Текущие пределы обнаружения фтора составляют 0.35 пг для прямого ввода проб газа в плазму и 1 пг для гибридного газохроматографического-ИСП определения.

28. Greenfield S. Plasma spectroscopy comes of age // *Analyst.* 1980. V. 105. P. 1032-1044.

<https://doi.org/10.1351/pac198052112509>

Приведен обзор метода АЭС-ИСП с достигнутыми к этому моменту времени пределами обнаружения элементов, точностью анализа и уровнем матричных неспектральных помех. Обсужден вопрос применения ИСП малой и большой мощности.

## 1981

29. Mermet J.M., Trassy C. A spectrometric study of a 40 MHz inductively coupled plasma. V. Discussion of spectral interferences and line intensities // *Spectrochim. Acta. Part B.* 1981. V. 36. P. 269-292.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(81\)80030-4](https://doi.org/10.1016/0584-8547(81)80030-4)

Описано в примерах нескольких причин спектральных помех в АЭС-ИСП. Особое внимание уделено уширению спектральных линий и его влиянию на результаты анализа.

## 1982

30. Forster R., Anderson T.A., Parsons M.L. ICP Spectra: I. Background emission // *Appl. Spectrosc.* 1982. V. 36. P. 499-504.

<https://opg.optica.org/as/abstract.cfm?URI=as-36-5-499>

Фоновые спектры, возникающие в ИСП с использованием стандартных операционных условий анализа, сведены в таблицу и классифицированы в диапазоне от 2075 до 6005 Å (разрешение 0.01 Å) для атомных линий Ar, H, C, Si и молекулярной полосы OH. Возможные спектральные помехи этих фоновых спектров для аналитических линий обсуждены и сведены в таблицу.

31. Anderson T.A., Forster R., Parsons M.L. ICP emission spectra: II. Alkaline earth elements // *Appl. spectrosc.* 1982. V. 36. P. 504-509.

<https://doi.org/10.1366/0003702824639457>

Спектры, возникающие в ИСП для щелочноземельных элементов с использованием стандартных операционных условий анализа, сведены в таблицу и классифицированы в диапазоне от 2075 до 6005 Å (разрешение 0.01 Å).

32. Winge R.K., Fassel V.A., Peterson V.J., Floyd M.A. ICP emission spectrometry: on the selection of analytical lines, line coincidence tables, and wavelength tables // *Appl. spectrosc.* 1982. V. 36. P. 210-221.

<https://doi.org/10.1366/0003702824638502>

Составлен атлас спектральной информации для АЭС-ИСП, предлагающий аналитику основные сведения об аналитических возможностях и потенциальных спектральных помехах для наиболее сильных спектральных линий 70 элементов. Атлас содержит 232 сканирования длин волн 70 элементов, охватывающих диапазон от 189 до 517 нм (от 189 до 597 нм для натрия), список 973 сильных спектральных линий с оценочными пределами обнаружения и подробный набор контуров совпадений для 281 наиболее интенсивных линий с возможными наложениями контуров линий особенно распространенных сопутствующих элементов.

33. Michaud E., Mermet J.M. Iron spectrum in the 200-300 nm range emitted by an inductively coupled argon plasma // *Spectrochim. acta. Part B.* 1982. V. 37. P. 145-164.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(82\)80053-0](https://doi.org/10.1016/0584-8547(82)80053-0)

Изучен спектр железа в диапазоне 200-300 нм в АЭС-ИСП. Обнаружено около сотни линий, которые до сих пор не были зарегистрированы. Приведены примеры спектральных помех и выводы по области, охватываемой различными спектральными таблицами.

## 1983

34. Grabau F., Talmi Y. Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy with multichannel array detection // *Multichannel image detectors. V. 2. ACS symposium series. V. 236. USA: American chemical society, 1983. P. 75-116.*

<https://doi.org/10.1021/bk-1983-0236.ch004>

В главе представлена критическая оценка самосканирующихся фотодиодных матриц в качестве детекторов излучения для АЭС-ИСП. Поведено сравнение видиконов и фотодиодных матриц по шумовым характеристикам и чувствительности, линейности и динамическому диапазону, спектральному разрешению и возможности коррекции переменного основного фона.

35. Boumans P.W.J.M. An assessment of prominent lines in inductively-coupled argon plasmas with special reference to spectrographic general survey analysis // *Spectrochim. acta. Part B.* 1983. V. 38. P. 747-776.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(83\)80174-8](https://doi.org/10.1016/0584-8547(83)80174-8)

598 наиболее сильных спектральных линий аргоновой АЭС-ИСП были изучены со следующими целями: составление библиотеки заметных линий для spectroграфического общего обзорного

анализа, сравнение пределов обнаружения и чувствительности линий с литературными данными, составление списка линий с «универсальными» значениями чувствительности, которые обычно можно использовать для полуколичественного анализа. Рассмотрен спектральный диапазон от 235 до 446 нм.

## 1984

36. Galan de L. Some considerations on the excitation mechanism in the inductively coupled plasma // *Spectrochim. Acta. Part B.* 1984. V. 39. P. 537-550.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(84\)80061-0](https://doi.org/10.1016/0584-8547(84)80061-0)

Условия возбуждения в аналитической зоне наблюдения аргоновой ИСП не могут быть описаны моделью частичного ЛТР. Проанализированы четыре альтернативные модели, предложенные в литературе и включающие метастабильные атомы аргона, захват излучения, скорости реакции, амбиполярную диффузию. Сделан вывод, что эти модели являются скорее дополнительными. Они скомпонованы в новую модель, которая рассматривает ИСП, как распадающуюся плазму.

37. Anderson T.A., Parsons M.L. ICP emission spectra III: The spectra of the group IIIA elements and spectral interferences due to group IIA and IIIA elements // *Appl. Spectrosc.* 1984. V. 38. P. 625-634.

<https://doi.org/10.1366/0003702844554846>

Спектры элементов группы IIIA, наблюдаемые в ИСП в диапазоне длин волн от 199.5 до 600.5 нм, были сведены в таблицы. Эти таблицы сопоставлены со списком тех аналитических линий, которые чаще всего используют в АЭС-ИСП для определения 71 элемента. На основе этого разработаны таблицы возможных спектральных помех от элементов группы IIIA и щелочноземельных элементов.

38. Caughlin B.L., Blades M.W. An evaluation of ion-atom emission intensity ratios and local thermodynamic equilibrium in an argon inductively coupled plasma // *Spectrochim. acta. Part B.* 1984. V. 39. P. 1583-1602.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(84\)80188-3](https://doi.org/10.1016/0584-8547(84)80188-3)

Пространственно разрешенные радиальные профили электронной плотности в ИСП были измерены при различных значениях высокочастотной мощности и высоты зоны наблюдения над индуктором. Экспериментально полученные при этом ион-атомные отношения интенсивностей спектральных линий Mg и Cd были меньше, чем рассчитанные,

исходя из ЛТР. Сделан вывод о том, что ИСП можно характеризовать как ионизирующую плазму.

39. Boumans P.W.J.M., Vrakking J.J.A.M. High-resolution spectroscopy using an echelle spectrometer with predisperser-II. Analytical optimization for inductively coupled plasma atomic emission spectrometry // *Spectrochim. acta. Part B.* 1984. V. 39. P. 1261-1290.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(84\)80211-6](https://doi.org/10.1016/0584-8547(84)80211-6)

Выполнена оптимизация ширины щели (и, следовательно, практической разрешающей способности) эшелле-спектрометра с ИСП. Эксперименты проведены для набора заметных линий ИСП, распределенных между 190 и 500 нм. Достигнутые при оптимальных условиях пределы обнаружения элементов были лучше на порядок величины, чем указанные в литературе. Рассмотрено влияние уровня непрерывного спектрального фона на достигаемые пределы обнаружения элементов.

## 1985

40. McLaren J.W., Berman S.S. Wavelength selection for trace analysis by ICP-AES // *Spectrochim. acta. Part B.* 1985. V. 40. P. 217-225.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(85\)80024-0](https://doi.org/10.1016/0584-8547(85)80024-0)

Сильные и слабые стороны имеющихся в настоящее время таблиц спектральных линий, используемых для прогнозирования и идентификации спектральных помех в АЭС-ИСП, проиллюстрированы описанием процесса выбора длины волны для нескольких сложных анализов следов. Сделан вывод о том, что в обозримом будущем оценка экспериментально полученных контуров спектральных линий останется ключом к оптимальному выбору аналитических линий. Для этого будет необходимо использовать классические таблицы спектральных линий и новые таблицы, полученные для АЭС-ИСП.

41. Caughlin B.L., Blades M.W. Analyte ionization in the inductively coupled plasma // *Spectrochim. acta. Part B.* 1985. V. 40. P. 1539-1554.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(85\)80177-4](https://doi.org/10.1016/0584-8547(85)80177-4)

Пространственно разрешенные радиальные профили электронной плотности в ИСП были измерены для Sr, Ca, Mg, Cd, Zn при различных значениях высокочастотной мощности и высоты зоны наблюдения над индуктором. Экспериментально полученные при этом ион-атомные отношения интенсивностей спектральных линий элементов были в пределах порядка величины с рассчитанными, исходя из ЛТР. Установлено что степень ионизации

элементов и отклонение от ЛТР сильно коррелируют с потенциалом ионизации элемента.

42. Boumans P.W.J.M., Vrakking J.J.A.M. Spectral interferences in inductively coupled plasma atomic emission spectrometry-I. A theoretical and experimental study of the effect of spectral bandwidth on selectivity, limits of determination, limits of detection and detection power // *Spectrochim. acta. Part B.* 1985. V. 40. P. 1085-1105.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(85\)80051-3](https://doi.org/10.1016/0584-8547(85)80051-3)

В статье рассмотрено влияние спектрального разрешения на «селективность» анализа в случае образцов, излучающих богатые линиями спектры. В качестве критерия вводится понятие «селективности линии», связанное с аналитической ошибкой. Этот подход приводит к установлению однозначной зависимости предела определения элементов от спектрального разрешения. Экспериментально показано, что в случае перекрытия контуров спектральных линий предел определения может превышать предел обнаружения на один или даже два порядка, Главное преимущество высокого разрешения спектрального прибора заключается в снижении предела определения элементов, но не их предела обнаружения.

43. Blades M.W., Caughlin B.L. Excitation temperature and electron density in the inductively coupled plasma-aqueous vs organic solvent introduction // *Spectrochim. acta. Part B.* 1985. V. 40. P. 579-591.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(85\)80107-5](https://doi.org/10.1016/0584-8547(85)80107-5)

Для ИСП измерены пространственно разрешенные профили интенсивности Fe I, определены температуры возбуждения и плотности электронов при вводе водного и ксилолового раствора. Для фиксированных мощности разряда и высоты наблюдения температура возбуждения оказалась ниже в ИСП с органическим аэрозолем.

44. Boumans P.W.J.M., Vrakking J.J.A.M. Spectral interferences in inductively coupled plasma atomic emission spectrometry-II. An experimental study of the effect of spectral bandwidth on the inaccuracy in net signals originating from wavelength positioning errors in a slew-scan spectrometer // *Spectrochim. acta. Part B.* 1985. V. 40. P. 1107-1125.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(85\)80052-5](https://doi.org/10.1016/0584-8547(85)80052-5)

Рассмотрена оценка погрешности измерения чистых сигналов аналитов, обусловленная ошибкой позиционирования длины волны в монохроматоре с поворотным сканированием в случае перекрытия контуров аналитической линии мешающей. На

примере сильных линий Al, Ca, V, Nb, Bi и Sn, перекрывающихся компонентами молекулярной полосы OH, рассмотрены преимущества спектральных приборов высокого разрешения.

45. Davies J., Dean J.R., Snook R.D. Axial view of an inductively coupled plasma // *Analyst*. 1985. V. 110. P. 535-540.

<https://doi.org/10.1039/AN9851000535>

При аксиальном наблюдении ИСП изучена пространственная зависимость отношения интенсивностей ионных и атомных линий кальция и отношения сигнала к фону, измерены плотность электронов, температура ионизации и температура возбуждения.

46. Шабанова Л.Н., Бухбиндер Г.Л., Гильберт Э.Н. О выборе растворителя для органических проб при прямом анализе атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой // *Ж. аналит. химии*. 1985. Т. 40. С. 1565-1568.

Для прямого элементного анализа органических проб предложены растворители, обеспечивающие лучшие метрологические характеристики определений.

## 1986

47. Naoki Furuta. Spatial emission distribution of YO, Y I, Y II and Y III radiation in an inductively coupled plasma for the elucidation of excitation mechanisms // *Spectrochim. acta. Part B*. 1986. V. 41. P. 1115-1129.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(86\)80130-6](https://doi.org/10.1016/0584-8547(86)80130-6)

Изучение вертикальных и радиальных профилей интенсивностей спектральной полосы YO и спектральных линий Y I, Y II и Y III позволило сделать заключение о механизме и зонах возбуждения в ИСП.

48. Edelson M.C., DeKalb E.L., Winge R.K., Fassel V.A. Analytical atomic spectroscopy of plutonium-I. High resolution spectra of plutonium emitted in an inductively coupled plasma // *Spectrochim. acta. Part B*. 1986. V. 41. P. 475-486.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(86\)80186-0](https://doi.org/10.1016/0584-8547(86)80186-0)

В спектре атомной эмиссии ИСП в диапазоне 200-700 нм выявлено 23 линии Pu с пределами обнаружения менее 100 нг/мл. Лучший предел обнаружения найден для линии Pu 453.614 нм (15 нг/мл). Определены линии, пригодные для изотопного анализа плутония.

49. Gray A.L. Ions or photons – an assessment of the relationship between emission and mass spectrometry with the ICP // *Fresenius Z. anal. chem.* 1986. B. 324. S. 561-570.

<https://doi.org/10.1007/BF00470412>

Дан обзор физических различий между работой ИСП, используемой в эмиссионном спектральном анализе и масс-спектрометрии. Аналитические возможности методов описаны с точки зрения пределов обнаружения, спектральных и неспектральных матричных помех. Отмечена высокая перспективность развития многоэлементного метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (**МС-ИСП**).

50. Boumans P.W.J.M. A century of spectral interferences in atomic emission spectroscopy – Can we master them with modern apparatus and approaches? // *Fresenius Z. anal. chem.* 1986. B. 324. S. 397-425.

<https://doi.org/10.1007/BF00474112>

В статье обсуждены два основных направления удаления спектральных помех: обработка огромных объемов спектральных данных для повышения избирательности атомно-эмиссионной спектроскопии и повышение селективности спектральных измерений. Первое направление требует применения компьютерных методов обработки информации и развития соответствующего программного обеспечения, второе – улучшения практической разрешающей способности спектрометров. Обсуждены перспективность и особенности развития каждого направления.

## 1987

51. Broekaert J.A.C. Trends in optical spectrochemical trace analysis with plasma sources // *Anal. chim. acta*. 1987. V. 196. P. 1-21.

[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)83065-2](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)83065-2)

Рассмотрено состояние и тенденции развития оптического спектрохимического следового анализа с ИСП, плазмой постоянного тока и микроволновой плазмой. Отмечены перспективы ИСП с низким потреблением газа, возможностью работы с воздухом и гелием. Ввод образцов с помощью новых пневматических распылителей, проточной инжекции, электротермического испарения, генерации гидридов, непосредственно в плазму. Повышение информативности анализа возможно за счет спектрометрии высокого разрешения, спектрометрии с преобразованием Фурье и за счет использования многоканальных детекторов.

52. LaFreniere B.R., Houk R.S., Fassel V.A. Direct detection of vacuum ultraviolet radiation through an optical sampling orifice: analytical figures of merit for the nonmetals, metalloids, and selected metals by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry // *Anal. chem.* 1987. V. 59. P. 2276-2282.

<https://doi.org/10.1021/ac00145a015>

Возможно прямое наблюдение вакуумного ультрафиолетового излучения ИСП для определения Вг и Сl при анализе растворов с пределами обнаружения 50 нг/мл и менее (ультразвуковое распыление). Al, Ga и В обладают интенсивными линиями в вакуумной УФ области, что обеспечивает лучшие пределы обнаружения, чем в традиционном спектральном диапазоне.

53. Wünsch G., Wennemer A. Spektrallinien und koinzidenztafeln zur bestimmung von zirkonium, niob und tantal mit dem ICP // *Fresenius Z. anal. chem.* 1987. B. 329. P. 546-570. (на немецком языке)

<https://doi.org/10.1007/BF00488204>

Приведены спектральные линии и таблицы их совпадений для определения циркония, ниобия и тантала с помощью метода АЭС-ИСП (для 20 линий Zr, 9 линий Nb и 7 линий Ta). Таблицы включают 582 мешающие линии 49 элементов. Указанные данные по спектральным помехам справедливы для ширины полосы пропускания спектрального прибора 16 пм и концентрации мешающего элемента 1000 мкг/л. Для следовых определений Zr, Nb и Ta в матрицах Fe, W, Zr, Nb и Ta зависимость спектральных помех от концентрации матрицы указана до 10 000 мкг/л.

54. Boumans P.W.J.M., Vrakking J.J.A.M. Detection limits of about 350 prominent lines of 65 elements observed in 50 and 27 MHz inductively coupled plasmas (ICP): effects of source characteristics, noise and spectral bandwidth. "Standard" values for the 50 MHz ICP // *Spectrochim. acta. Part B.* 1987. V. 42. P. 553-579.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(87\)80034-4](https://doi.org/10.1016/0584-8547(87)80034-4)

Ширина контуров 350 сильных спектральных линий использована для оценки пределов обнаружения с различными ИСП и разными спектрометрами. Это позволяет учитывать характеристики шума и спектральной полосы пропускания прибора. Показано, что ИСП на частоте 50 МГц имеют в 3-15 раз лучшие соотношения сигнал/шум, чем ИСП на частоте 27 МГц.

55. Boumans P.W.J.M., Vrakking J.J.A.M. Detection limit including selectivity as a criterion for line se-

lection in trace analysis using inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) a tutorial treatment of a fundamental problem of AES // *Spectrochim. acta. Part B.* 1987. V. 42. P. 819-840.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(87\)80144-1](https://doi.org/10.1016/0584-8547(87)80144-1)

В качестве количественного критерия выбора аналитической спектральной линии в АЭС-ИСП предлагается «истинный предел обнаружения»: сумма коэффициента селективности, который учитывает дополнительный шум, возникающий в результате перекрытия контуров линий, и «традиционного предела обнаружения», охватывающего общие источники шума для помехоустойчивого режима и, кроме того, эффект крыльев линий. Показано, что данный подход позволяет принимать простые и однозначные решения по выбору линии. Утверждается, что этот подход должен быть применим к многокомпонентным образцам любой сложности.

56. Boumans P.W.J.M., Vrakking J.J.A.M. Inductively coupled plasmas: line widths and shapes, detection limits and spectral interferences. An integrated picture. Plenary lecture // *J. of anal. atom. spectrom.* 1987. V. 2. P. 513-525.

<https://doi.org/10.1039/JA9870200513>

В статье обсуждено значение базовых знаний об атомных спектрах для интерпретации пределов обнаружения, оптимизация выбора аналитических линии и разработки библиотек спектральных помех в применении к АЭС-ИСП.

## 1988

57. Hiroki Haraguchi, Tetsuya Hasegawg. Inductively coupled plasmas in analytical atomic spectrometry: excitation mechanisms and analytical feasibilities // *Pure & appl. chem.* 1988. V. 60. P. 685-696.

<https://doi.org/10.1351/pac198860050685>

На основе теории столкновительно-радиационных процессов обсуждены механизмы возбуждения в ИСП: возбуждение и девозбуждение электронным ударом, ионизация электронным ударом и трехчастичная рекомбинация, спонтанная эмиссия и наведенное поглощение, излучательная рекомбинация, пеннинговская ионизация и перенос заряда. Сделано предположение, что электронно-столкновительные процессы возбуждения и ионизации являются доминирующими при определении численности атомов и ионов в нормально аналитической зоне ИСП.

58. Кузьмин Н.М., Красильщик В.З. Применение концентрирования микроэлементов в атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктив-

но-связанной плазмой // Ж. аналит. химии. 1988. Т. 43. № 8. С. 1349-1357.

Рассмотрены вопросы химического концентрирования в сочетании с методом АЭС-ИСП, направленные на снижение пределов определения элементов.

### 1989

59. Boumans P.W.J.M. Detection limits for lines widely differing in "hardness" and intensity ratios of ionic to atomic lines measured in 50 and 100 MHz inductively coupled plasmas // Spectrochim. acta. Part B. 1989. V. 44. P. 1285-1296.

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(89\)80126-0](https://doi.org/10.1016/0584-8547(89)80126-0)

С использованием одних и тех же распылителей и плазменной горелки аргоновых ИСП с рабочей частотой 50 и 100 МГц в оптимальных условиях получены пределы обнаружения 55 элементов с использованием 84 спектральных линий. Найденные экспериментальные пределы обнаружения элементов практически не отличались между собой, что может отражать близкие условия возбуждения в двух ИСП.

### 1990

60. Boumans P.W.J.M. Line interference, line selection, and true detection limit in inductively coupled plasma emission spectrometry // Spectrochim. acta. Part B. 1990. V. 45. P. 1121-1138

[https://doi.org/10.1016/0584-8547\(90\)80175-1](https://doi.org/10.1016/0584-8547(90)80175-1)

Подробный анализ формулировки истинного предела обнаружения, как суммы индекса селективности спектральной линии и обычного предела обнаружения элемента. В сочетании со спектральной фильтрацией Кальмана это позволяет составить базы данных для априорного выбора спектральных линий при АЭС-ИСП в условиях спектральных помех.

61. Houk R.S. Elemental analysis by atomic emission and mass spectrometry with inductively coupled plasma // Handbook on the physics and chemistry of rare earths. V. 13. Ed. K.A. Gschneidner and L. Eyring. Elsevier Science Publishers B.V., 1990. P. 385-421.

[https://doi.org/10.1016/S0168-1273\(05\)80134-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1273(05)80134-5)

Рассмотрены свойства ИСП, введение образцов, конфигурация плазмы, физические условия в осевом канале плазмы, аналитические измерения методом АЭС-ИСП (инструментарий, спектральное излучение ИСП, пределы обнаружения и помехи, типичные применения метода) и МС-ИСП.

### 1991

62. Mermet J.M. Use of magnesium as a test element for inductively coupled plasma atomic emission spectrometry diagnostics // Anal. chim. acta. 1991. V. 250. P. 85-94.

[https://doi.org/10.1016/0003-2670\(91\)85064-Y](https://doi.org/10.1016/0003-2670(91)85064-Y)

Для оптимизации процессов атомизации и ионизации в методе АЭС- ИСП предложено использовать экспериментальное отношение интенсивностей спектральных линий Mg II 280 270 нм/Mg I 285 213 нм. Теоретическое значение этой величины рассчитывается на основе условий ЛТР в ИСП. По экспериментальным данным рассмотрено влияние на это отношение вкладываемой в разряд высокочастотной мощности, скорости потока газа, диаметра инжектора горелки, присутствия водорода. Значения отношения, близкие к теоретическим, достигается за счет использования высокой мощности разряда, малого расхода газа и большого внутреннего диаметра инжектора. Использование отношения позволяет выбрать оптимальные условия для определения элементов с учетом матричных помех.

### 1992

63. Totland M., Jarvis I., Jarvis K.E. An assessment of dissolution techniques for the analysis of geological samples by plasma spectrometry // Chem. geology. 1992. V. 95. P. 35-62.

[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90042-4)

С использованием стандартных образцов NBS критически оценены результаты, полученные двумя обычно используемыми методами подготовки проб: сплавление с LiBO<sub>2</sub> и растворение смесью HF-HClO<sub>4</sub> в открытом сосуде. Выполнено сравнение с данными, полученными в результате кислотного разложения в герметичных сосудах с микроволновым нагревом. Для оценки общей эффективности каждой процедуры растворения содержание 24 микроэлементов было определено методом АЭС-ИСП, все редкоземельные элементы – методом МС-ИСП. Приведены результаты по полноте вскрытия, потерям микроэлементов, времени разложения, расходу реагентов.

64. Carey J.M., Caruso J.A. Electrothermal vaporization for sample introduction in plasma source spectrometry // Crit. rev. in anal. chem. 1992. V. 23. P. 397-439.

<https://doi.org/10.1080/10408349208051652>

Обсуждены достоинства электротермического испарения для ввода образцов в спектрохимические плазменные источники. В обзоре рассмотрено

текущее состояние электротермического ввода образцов и будущие направления этой техники.

65. A critical survey of hydride generation techniques in atomic spectroscopy (Technical report IUPAC). Ed. D. Campbell // *Pure & appl. chem.* 1992. V. 64. P. 227-244.

<https://doi.org/10.1351/pac199264020227>

Обсуждены последние достижения в технике гидридов для определения Sb, As, Bi, Ge, Pb, Se и Te методами атомной абсорбции АЭС-ИСП.

### 1993

66. Boumans P.W.J.M. Developments and trends in plasma spectrochemistry – A View. Plenary lecture // *J. of anal. atom. spectrom.* 1993. V. 8. P. 767-780.

<https://doi.org/10.139/JA99330800767>

Обзор истории плазменной спектроскопии за последние 40 лет и личный взгляд автора на последние разработки, современные тенденции и будущие перспективы в АЭС-ИСП и МС-ИСП. Статья завершается кратким обзором конференций по плазменной спектроскопии за последние 18 лет.

67. Barnard T.W., Crockett M.I., Ivaldi J.C., Lundberg P.L., Yates D.A., Levine P.A., Sauer D.J. Solid-state detector for ICP-OES // *Anal. chem.* 1993. V. 65. P. 1231-1239.

<https://doi.org/10.1021/ac00057a021>

Описание нового твердотельного детектора на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) для АЭС-ИСП с высокой квантовой эффективностью в УФ диапазоне, низким шумом, большим динамическим диапазоном, быстрым считыванием, широким спектральным интервалом (167-782 нм) и высоким спектральным разрешением. Детектор содержит 224 линейных матрицы фотодетекторов, позволяющих регистрировать три-четыре основных аналитических линии для каждого из 72 элементов и охватывают более 5000 линий излучения ИСП. Детектор имеет фотометрические характеристики (квантовая эффективность, шум, динамический диапазон), равные или превосходящие фотоэлектронные умножители для АЭС-ИСП. Одновременно измеренные спектральные данные могут использоваться для коррекции спектральных помех и коррелированного фонового шума.

### 1994

68. Jacksier T., Barnes R.M. Atomic emission spectra of xenon, krypton, and neon: spectra from 200 to 900 nm by sealed inductively coupled plasma/

atomic emission spectroscopy // *Appl. spectrosc.* 1994. V. 48. P. 65-71

<https://doi.org/10.1366/0003702944027543>

Приведены спектры излучения чистого ксенона, криптона и неона в спектральном диапазоне от 200 до 900 нм от закрытого разряда ИСП, работающего при атмосферном давлении и мощности 350 Вт.

### 1995

69. Hwang J.D., Wang W.J. Application of ICP-AES to analysis of solutions // *Appl. spectrosc. rev.* 1995. V. 30. P. 231-350.

<https://doi.org/10.1080/05704929508000911>

История развития разряда с ИСП, сравнение с другими спектральными источниками, отбор и подготовка проб, способы введения проб, методология анализа, применение АЭС-ИСП для анализа различных объектов, направления развития метода.

### 1996

70. Schram D.C., Mullen van der J.A.M., Regt de J.M., Benoy D.A., Fey F.H.A.G., Jonkers J. Fundamental description of spectrochemical inductively coupled plasmas. Plenary lecture // *J. of anal. atom. spectr.* 1996. V. 11. P.623-632.

<https://doi.org/10.1039/JA9961100623>

Выполнен обзор по неравновесному моделированию процессов в ИСП атмосферного давления. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с опубликованными экспериментальными для более низких частот возбуждения плазмы. Однако для высоких частот модельные плазмы имеют тенденцию оставаться слишком близко к стенке горелки. Сделан вывод, что даже в аргоновой плазме диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов дает дополнительный путь рекомбинации вблизи стенки, где плотность нейтрального основного состояния высока, а температура низкая.

### 1998

71. Al-Ammar A.S., Barnes R.M. Correction for non-spectroscopic matrix effects in inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy by internal standardization using spectral lines of the same analyte // *Spectrochim. acta. Part B.* 1998. V. 53. P. 1583-1593.

[https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(98\)00190-6](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(98)00190-6)

Для внесения поправок на матричные несспектральные помехи предложена методика внутренней стандартизации, основанная на одновременном измерении двух разных спектральных линий одного

и того же аналита. В этом случае матричный поправочный коэффициент определяют по его линейной корреляции с отношением интенсивностей этих двух измеренных линий, что обеспечивает значительное снижение матричного эффекта.

## 1999

72. Todoli J.-L., Mermet J.J. Acid interferences in atomic spectrometry: analyte signal effects and subsequent reduction // *Spectrochim. acta. Part B*. 1999. V. 54. P. 895-929.

[https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(99\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(99)00041-5)

Обобщение опубликованных данных показывает, что кислоты, используемые при подготовке проб и градуировочных образцов, являются одним из наиболее важных источников помех в элементной атомной спектроскопии. Кратко описаны способы учета и устранения кислотного эффекта.

## 2000

73. Greenfield S. Invention of the annular inductively coupled plasma as a spectroscopic source // *J. of chem. educat.* 2000. V. 77. P. 584-591.

<https://doi.org/10.1021/ed077p584>

Рассмотрена история применения электрических разрядов в качестве высокотемпературных источников для атомной спектроскопии и изобретение кольцевой ИСП, массово используемой сейчас в аналитической химии. Обсуждены дальнейшие возможные улучшения ИСП и вспомогательного оборудования.

74. Brenner I.B., Zander A.T. Axially and radially viewed inductively coupled plasmas – a critical review // *Spectrochim. acta. Part B*. 2000. V. 55. P. 1195-1240.

[https://doi.org/10.1016/s0584-8547\(00\)00243-3](https://doi.org/10.1016/s0584-8547(00)00243-3)

Сопоставлены характеристики приборов АЭС-ИСП с радиальным и аксиальным наблюдением спектра: конфигурации спектрометров, пределы обнаружения, спектральный фон, помехи от легкоионизируемых элементов, различные системы ввода проб.

## 2001

75. Schulz O., Heitland P. Application of prominent spectral lines in the 125-180 nm range for inductively coupled plasma optical emission spectrometry // *Fresenius J. anal. chem.* 2001. B. 371. P. 1070-1075.

<https://doi.org/10.1007/s002160100993>

Приведены таблицы возбуждаемых в индуктивно связанной плазме интенсивных спектральных линий для Al, Br, Cl, Ga, Ge, I, In, N, P, Pb, Pt, S и Te в диапазоне длин волн 125–180 нм. Рассчитаны пределы обнаружения по данным линиям при анализе водных растворов с использованием пневматического распыления.

76. Dennaud J., Howes A., Poussel E., Mermet J.-M. Study of ionic-to-atomic line intensity ratios for two axial viewing-based inductively coupled plasma atomic emission spectrometers // *Spectrochim. acta. Part B*. 2001. V. 56. P. 101-112.

[https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(00\)00299-8](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(00)00299-8)

Для двух приборов АЭС-ИСП с аксиальным обзором плазмы изучено поведение интенсивности спектральных линий и отношения интенсивностей ионной и атомной линий Mg, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn к изменению операционных условий анализа и матричного состава пробы. Установлено, что соотношение интенсивностей линий Mg II/Mg I является наиболее удобным показателем, который необходимо использовать в практической работе. Аксиальное наблюдение плазмы приводит к проявлению матричных эффектов, особенно в случае атомных спектральных линий.

77. Chausseau M., Poussel E., Mermet J.-M. Self-absorption effects in radially and axially viewed inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry – the key role of the operating conditions // *Fresenius J. anal. chem.* 2001. B. 370. S. 341-347.

<https://doi.org/10.1007/s002160100852>

Изучены эффекты самопоглощения спектральных линий в АЭС-ИСП, приводящие к искривлению верхней части градуировочных графиков. Установлено, что значение вкладываемой в разряд высокочастотной мощности и скорость потока газа носителя играют важную роль в процессах самопоглощения спектральных линий. Рассмотрены вопросы уменьшения и подавления эффекта самопоглощения, улучшения качества градуировки в условиях самопоглощения спектральных линий.

## 2002

78. Russo R.E., Xianglei Mao, Liu H., Gonzalez J., Samuel S. Mao J.S. Laser ablation in analytical chemistry – A review // *Talanta*. 2002. V. 57. P. 425-451.

<http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-48521>

[https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(02\)00053-x](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(02)00053-x)

В обзоре описаны недавние исследования по пониманию и использованию лазерной абля-

ции для прямого отбора проб твердых веществ с акцентом на введение образца в ИСП. Обсуждены текущие исследования, связанные с современными экспериментальными системами, градуировкой и оптимизацией, а также фракционированием.

79. Todoli J.L., Gras L., Hernandis V., Mora J. Elemental matrix effects in ICP-AES // *J. anal. at. spectrom.*, 2002. V.17. P. 142-169.

<https://doi.org/10.1039/B009570m>

Обзор по матричным неспектральным помехам в АЭС-ИСП: влияние сопутствующих веществ на крупность аэрозоля, скорость переноса аналита и растворителя, тепловые свойства плазмы, аналитический сигнал; влияние скорости потока распыляющего газа и мощности плазмы, зоны и способа наблюдения плазмы на уровень помех; влияние мешающего элемента на аналитический сигнал; влияние системы ввода жидкой пробы (распылитель и распылительная камера, система десольватации аэрозоля) на уровень помех. Рассмотрены механизмы матричных неспектральных помех и способы их коррекции.

### 2003

80. Mora J., Maestre S., Hernandis V., Todoli J.L. Liquid-sample introduction in plasma spectrometry // *Trends in anal. chem.* 2003. V. 22. P. 123-132.

[https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)00301-7](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)00301-7)

В статье описаны различные варианты систем введения жидких проб в спектрометры с ИСП. Подчеркнуты их основные преимущества и недостатки. Выполнен обзор процессов, влияющих на характеристики аэрозоля между его образованием и достижением плазмы.

### 2004

81. Iglesias M., Vaculovic T., Studynkova J., Poussel E., Mermet J.-M. Influence of the operating conditions and of the optical transition on non-spectral matrix effects in inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry // *Spectrochim. acta. Part B.* 2004. V. 59. P. 1841-1850.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0584854704002782>

С использованием матриц К, Na, Li, Са и Mg для элементов с большим количеством спектральных линий (Mn, Cr и Cu) изучено влияние в АЭС-ИСП с аксиальным наблюдением условий работы плазмы, мощности и скорости потока газа-носителя, а также оптического перехода на проявление неспектральных матричных помех. Сделан вывод о том, что величина матричных эффектов зависит от рабочих условий

плазмы, но также может зависеть от оптического спектрального перехода, иллюстрируя сложность этих эффектов.

### 2006

82. Todolí J.L., Mermet J.M. Sample introduction systems for the analysis of liquid microsamples by ICP-AES and ICP-MS // *Spectrochim. acta. Part B.* 2006. V. 61. P. 239-283.

<https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.12.010>

Обзор посвящен фундаментальным исследованиям процессов в ИСП от образования аэрозолей до возбуждения и ионизации аналита, когда скорость расхода жидкости не превышает 100 мкл/мин. Рассмотрены и сравнены различные подходы к непрерывному введению микрообразцов. Приведены основные рекомендации по выбору лучшей системы введения образцов в соответствии с особенностями образца.

### 2007

83. Trevizan L.C., Nobrega J.A. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry with axially viewed configuration: an overview of applications // *J. braz. chem. soc.* 2007. V. 18. P. 678-690.

<https://www.scielo.br/j/jbchs/a/y8HWQfq3gDXkCDTvC7sz7h/?lang=en&format=pdf>

В обзоре рассмотрены статьи, опубликованные с 1999 по 2006 год по использованию АЭС-ИСП с аксиальным обзором плазмы и отдувом «хвоста» плазмы. Отмечено значительное снижение матричных неспектральных помех.

84. Bin Hu, Shengqing Li, Guoqiang Xiang, Man He, Zucheng Jiang. Recent progress in electrothermal vaporization-inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry // *Appl. spectrosc. rev.* 2007. V. 42. P. 203-234.

<https://doi.org/10.1080/05704920601184317>

В большом обзоре рассмотрены недавние достижения в технике электротермического испарения для методов АЭС-ИСП и МС-ИСП. Особое внимание уделено механизму испарения аналитов, химической модификации, прямому анализу твердых образцов, методам предварительного концентрирования/разделения, а также использованию электротермического испарения при анализе их биологических, экологических, огнеупорных и высокочистых материалов.

## 2008

85. Resano M., Vanhaecke F., Loos-Vollebregt de M.T.C. Electrothermal vaporization for sample introduction in atomic absorption, atomic emission and plasma mass spectrometry—a critical review with focus on solid sampling and slurry analysis // *J. anal. atom. spectrom.* 2008. V. 23. P. 1450-1475.

<https://doi.org/10.1039/b807756h>

Рассмотрены и сравнены современные возможности электротермического испарения проб для атомно-абсорбционной спектроскопии, АЭС-ИСП и МС-ИСП: историческая эволюция этих методов, обзор наиболее важных достижений в области приборостроения, методологии и основ, наиболее важные приложения, реализованные за последнее десятилетие, достигнутые преимущества и перспективы.

86. Grindlay G., Gras L., Mora J., Loos-Vollebregt de M.T.C. Carbon-related matrix effects in inductively coupled plasma atomic emission spectrometry // *Spectrochim. acta. Part B.* 2008. V. 63. P. 234-243.

<https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.11.024>

Исследованы происхождение и эффектов матрицы в АЭС-ИСП, связанные с углеродом. Показано, что такие эффекты не зависят от источника углерода и становятся более серьезными, когда количество углерода, загружаемого в плазму, увеличивается: при высоких концентрациях углерода в пробах, высоких скоростях ввода пробы и эффективных системах ввода образца. При этом происходит снижение интенсивности спектральных линий с энергией возбуждения ниже 6 эВ, и увеличение интенсивности линий с более высокими энергиями возбуждения. Интенсивность излучения ионных линий не зависит от присутствия углерода.

## 2010

87. Mermet J.M. Calibration in atomic spectrometry: A tutorial review dealing with quality criteria, weighting procedures and possible curvatures // *Spectrochim. acta. Part B.* 2010. V. 65. P. 509-523.

<https://doi.org/10.1016/j.sab.2010.05.007>

Обзор по применению градуировки в атомной спектроскопии. Обсуждена адекватность применения коэффициента детерминации  $R^2$ , влияние процедуры взвешивания и различных весовых коэффициентов, а также сравнение линейной и квадратичной регрессии для решения проблем с кривизной градуировочных графиков. Все вопросы проиллюстрированы примерами, основанными на использовании АЭС-ИСП с распылением растворов и лазерной абляцией, а также метода лазерной искры (LIBS). Использование градуировочных графиков на несколько порядков концентраций определяемых

элементов может быть проблематичным, как и применение квадратичной регрессии для решения проблем с возможной кривизной графиков.

## 2011

88. Todoli J.L. Fundamentals and practical aspects of nonspectroscopic interferences in inductively coupled plasma atomic spectrometry // *Encyclopedia of analytical chemistry.* Online. 2006-2011. John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 25 p.

<https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9184>

Рассмотрено обнаружение матричных не-спектральных помех, влияние матрицы пробы на чувствительность определения, источники матричных эффектов, влияние элементного и кислотного состава, типа растворителей, возможные механизмы матричных эффектов при элементном и изотопном анализе, способы преодоления матричных эффектов.

## 2012

89. Zhou Long, Yamin Luo, Chengbin Zheng, Pengchi Deng, Xiandeng Hou. Recent advance of hydride generation—analytical atomic spectrometry: part I – technique development // *Appl. spectrosc. rev.* 2012. V. 47. P. 382-413.

<https://doi.org/10.1080/05704928.2012.666775>

В обзоре представлен обзор литературы по технологии генерации гидридов для аналитической атомной спектроскопии за последние годы: генерация гидридов на основе тетрагидробората и других реагентов; разработка родственных методов, связанных с генерацией гидридов для улучшения характеристик спектрального анализа.

## 2013

90. Zaranyika M.F., Mahamadi C. Departure from local thermal equilibrium during ICP-AES and FAES: Characterization in terms of collisional radiative recombination activation energy // *Pure appl. chem.* 2013. V. 85. P. 2231-2248.

<http://dx.doi.org/10.1351/PAC-CON-12-11-03>

Представлена упрощенная кинетическая модель процессов в плазме, показывающая, что когда аналиты определяются атомной спектроскопией в отсутствие, а затем в присутствии легкоионизируемых элементов, изменение энергии активации столкновительной излучательной рекомбинации равно нулю, если система соответствует локальному термодинамическому равновесию. Экспериментальные данные подтверждают, что ИСП не находится в состоянии ЛТР. Обсуждены возможные причины отклонения от ЛТР.

## 2014

91. Scheffler G.L., Pozebon D. Advantages, drawbacks and applications of mixed Ar–N<sub>2</sub> sources in inductively coupled plasma-based techniques: an overview // *Anal. methods*. 2014. V. 6. P. 6170-6182.

<https://doi.org/10.1039/c4ay00178h>

Рассмотрено использование смешанной газовой плазмы Ar–N<sub>2</sub> в атомной спектроскопии с ИСП. Выделены преимущества, ограничения и области применения смешанной плазмы в АЭС-ИСП и МС-ИСП. Обсуждены фундаментальные параметры плазмы (плотность электронов, температуры возбуждения или ионизации, образование оксидов, распределение пространственных профилей оксидов и атомных ионов).

## 2015

92. Leclercq A., Nonell A., Torro J.L.T., Carole B., Vio L., Vercouter T., Chartier F. Introduction of organic/hydro-organic matrices in inductively coupled plasma optical emission spectrometry and mass spectrometry: a tutorial review. Part I. Theoretical considerations // *Anal. chim. acta*. 2015. V. 885. P. 33-56.

<https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.03.049>

Обзор литературы по введению органических и водно-органических проб в АЭС-ИСП и МС-ИСП: влияние матрицы от процессов образования аэрозоля до процессов атомизации, возбуждения и ионизации; образование и распределение в плазме молекулярных углеродсодержащих частиц и последующие изменения фундаментальных свойств плазмы; инструментарий, адаптированные устройства для ввода проб, оптимизация инструментальных и рабочих параметров, аналитические стратегии для элементного количественного анализа.

## 2016

93. Grindlay G., Gras L., Mora J., Loos-Vollebregt de M.T.C. Carbon, sulfur and phosphorus-based charge transfer reactions in inductively coupled plasma atomic emission spectrometry // *Spectrochim. acta. Part B*. 2016. V. 115. P. 8-15.

<https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.10.010>

Исследовано влияние реакций переноса заряда атомами углерода, серы и фосфора на сигнал эмиссии 34 элементов в аксиальной АЭС-ИСП. Изучено поведение атомных и ионных линий As, Se, Te и Hg при введении разбавленных растворов глицерина, серной кислоты и фосфорной кислоты. Установлено в ряде случаев усиление атомной эмиссии за счет реакций переноса заряда. В целом усиление сигнала более выражено для электронных переходов, включающих самые высокие верхние

уровни энергии, и зависит от операционных условий плазмы. Легко ионизируемые элементы снижают ионизацию аналитов в плазме и, следовательно, уменьшают усиление сигнала за счет реакций переноса заряда.

94. Ohls K., Bogdain B. History of inductively coupled plasma atomic emission spectral analysis: from the beginning up to its coupling with mass spectrometry // *J. of anal. atom. spectrom.* 2016. V. 31. P. 22-31.

<https://doi.org/10.1039/c5ja90043c>

История развития метода АЭС-ИСП от момента возникновения до создания метода МС-ИСП.

95. Barin J.S., Mello P.A., Mesko M.F., Duarte F.A., Flores E.M.M. Determination of elemental impurities in pharmaceutical products and related matrices by ICP-based methods: a review // *Anal. bioanal. chem.* 2016. V. 408. P. 4547-4566.

<https://doi.org/10.1007/s00216-016-9471-6>

Описываются основные преимущества и ограничения методов АЭС-ИСП и МС-ИСП для анализа активных фармацевтических ингредиентов, сырья и фармацевтических лекарственных форм: стратегии, используемые для подготовки образцов, включая растворение в водных или органических растворителях, экстракцию, мокрое разложение и методы сжигания, а также прямой анализ твердого вещества; системы на основе ИСП, применяемые для анализа состава; помехи, наблюдаемые при анализе фармацевтических продуктов.

96. Krejčova A., Černohorsky T., Bendakovska L. A practical approach to non-spectral interferences elimination in inductively coupled plasma optical emission spectrometry // *Chem. papers*. 2016. V. 70. P. 669-684.

<https://doi.org/10.1515/chempap-2016-0004>

С использованием различных типов распылителей и распылительных камер изучено влияние Na, Ca, Ba, La, мочевины, азотной кислоты на интенсивность спектральных линий Cd, Cu, K, Mg, Mn, Pb, Zn и отношения интенсивностей линий Mg(II)/Mg(I). Распылитель Micromist в сочетании с распылительной камерой малого внутреннего объема обеспечил самые низкие матричные эффекты.

## 2017

97. Man He, Bin Hu, Beibei Chen, Zucheng Jiang. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry for rare earth elements analysis // *Phys. scienc. rev.* 2017. V. 2. P. 1-37.

<https://doi.org/10.1515/psr-2016-0059>

Отмечены сложности определения редкоземельных элементов методом АЭС-ИСП, связанные

с многочисленными спектральными помехами, и обсуждены различные способы их преодоления: разные приемы коррекции помех, соответствие матричной градуировке, использование внутреннего стандарта, разбавление проб, выбор системы ввода проб, химическое разделение.

98. Пупышев А.А. О возможности снижения систематических и случайных погрешностей атомно-эмиссионного спектрального анализа с использованием многолинейчатой градуировки // Завод. лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1, Ч. II. С. 20-30.

<https://www.zldm.ru/jour/article/view/369/370>

Рассмотрены основные систематические и случайные погрешности атомно-эмиссионного спектрального анализа, включая метод АЭС-ИСП, и различные методические приемы, используемые для их снижения: классическое применение внутреннего стандарта, учет матричных неспектральных помех, применение нескольких спектральных линий аналита и внутреннего стандарта без использования и с использованием весовых коэффициентов, учет нестабильности ввода пробы, условий возбуждения спектров и дрейфов. Показана необходимость введения этих методических приемов в программное обеспечение приборов.

99. Donati G.L., Amaisb R.S., Williams B. Recent advances in inductively coupled plasma optical emission spectrometry // J. of anal. atom. spectrom. 2017. V. 32. P. 1283-1296.

<https://doi.org/10.1039/C7JA00103G>

Рассмотрены самые последние достижения в области приборов, стратегий градуировки и разработки методов, которые способствовали улучшению аналитических показателей качества и расширению области применения АЭС-ИСП: низкое потребление Ar, двойной обзор плазмы, плазма смешанного газа и оптические системы высокого разрешения, электротермическое испарение, ультразвуковое распыление, химическая генерация паров, терморегулируемые распылительные камеры, новые подходы к минимизации матричных эффектов и повышению чувствительности и точности анализа.

## 2018

100. Carter J.A., Barros A.I., Nóbrega J.A., Donati G.L. Traditional calibration methods in atomic

spectrometry and new calibration strategies for inductively coupled plasma mass spectrometry // *Frontiers in chem.* 2018. V. 6. Article 504. 25 p.

<https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00504>

Обсуждены в приложении к АЭС-ИСП и МС-ИСП области применения, преимущества и ограничения традиционных, малораспространенных, а также нетрадиционных методов градуировки.

## 2019

101. Пупышев А.А. Спектральные помехи и их коррекция в атомно-эмиссионном спектральном анализе // Завод. лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Часть II. С. 15-32.

<https://www.zldm.ru/jour/article/view/878/769>

Рассмотрены основные источники спектральных помех в атомно-эмиссионном спектральном анализе, включая АЭС-ИСП. Приведены особенности проявления этих помех в различных спектральных источниках. Показаны возможности снижения уровня и устранения данных помех при конструировании и изготовлении приборов, выборе операционных условий анализа. Рассмотрены современные способы коррекции спектральных помех. Предложен алгоритм учета спектральных помех при разработке методик анализа.

## 2021

102. Grindlay G., Gras L., Mora J. Insight into the origin of carbon matrix effects on the emission signal of atomic lines in inductively coupled plasma optical emission spectrometry // *Spectrochim. acta. Part B.* 2021. V. 177. Article 106070.

<https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106070>

Изучено происхождение эффектов влияния углеродной матрицы на сигнал атомных линий в АЭС-ИСП. Зарегистрированы сигналы эмиссии 1755 атомных и 1853 ионных спектральных линий 62 элементов для углеродсодержащих глицериновых растворов (20 г/л). Отмечено увеличение и уменьшение сигналов атомной эмиссии для разных элементов. Результаты показали, что интенсивность матричных эффектов зависит как от энергии ионизации атомов аналита, так и от энергии верхнего электронного уровня спектральной линии, участвующего в электронном переходе. Предложены объяснения механизмов наблюдаемых явлений.