

Научная статья

УДК 54-438; 543.41; 543.422.7; 546.57; 546.05

doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.033

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЙОДИД-ИОНОВ

**Татьяна Сергеевна Колесникова<sup>1</sup>, Марина Олеговна Горбунова<sup>2</sup>, Игорь Ефимович Уфлянд<sup>3</sup>**

<sup>1–3</sup>Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Ростовский государственный медицинский университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>tkol@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9652-2978>

<sup>2</sup>mg700@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2792-8816>

<sup>3</sup>ieuflyand@sfedu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7164-8168>

### Аннотация

В настоящее время значительно возрос интерес химиков-аналитиков к металлосодержащим наноккомпозитам. Это связано, прежде всего, с возможностью их применения в качестве оптических сенсоров. Действие таких сенсоров основано на явлении поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Результатом данного исследования является разработка нового чувствительного метода определения йодид-ионов, основанного на использовании бумаги, модифицированной наночастицами (НЧ) серебра. Йодиды, окисляясь под действием специальных реагентов, образуют молекулярный йод, который экстрагируется потоком воздуха и переносится на чувствительный бумажный слой, содержащий НЧ. Взаимодействие НЧ с йодом приводит к отслеживаемым оптическим изменениям. Определен предел обнаружения (0,01 мг/л) и диапазон определяемых концентраций (0,03–0,3 мг/л) йодид-ионов.

### Ключевые слова:

металлосодержащие наноккомпозиты, наночастицы серебра, бумажные тест-полоски, йодид-ионы

### Финансирование:

работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-13-00260

### Для цитирования:

Колесникова, Т. С. Использование серебросодержащих наноккомпозитов в анализе йодид-ионов / Т. С. Колесникова, М. О. Горбунова, И. Е. Уфлянд // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 3. С. 181–185. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.033.

Original article

## USE OF SILVER-CONTAINING NANOCOMPOSITES FOR THE DETERMINATION OF IODIDE IONS

**Tatiana S. Kolesnikova<sup>1</sup>, Marina O. Gorbunova<sup>2</sup>, Igor E. Uflyand<sup>3</sup>**

<sup>1–3</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>tkol@sfedu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9652-2978>

<sup>2</sup>mg700@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2792-8816>

<sup>3</sup>ieuflyand@sfedu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7164-8168>

### Abstract

At present, the interest of analytical chemists in metal-containing nanocomposites has increased significantly. This is primarily due to the possibility of their application as optical sensors. The operation of such sensors is based on the phenomenon of surface plasmon resonance (SPR). The result of this study is the development of a new sensitive method for the determination of iodide ions based on the use of paper modified with silver nanoparticles (NPs). Iodides, oxidized under the action of special reagents, form molecular iodine, which is extracted by an air flow and transferred to a sensitive paper layer containing NPs. The interaction of NPs with iodine leads to traceable optical changes. The limit of detection (0.01 mg/L) and the range of determined concentrations (0.03–0.3 mg/L) of iodide ions were determined.

### Keywords:

metal-containing nanocomposites, silver nanoparticles, paper test strips, iodide ions

### Funding:

the work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-13-00260.

### For citation:

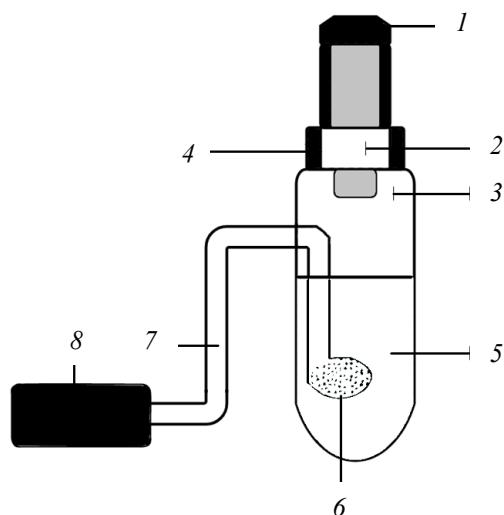
Kolesnikova, T. S. Use of silver-containing nanocomposites for the determination of iodide ions / T. S. Kolesnikova, M. O. Gorbunova, I. E. Uflyand // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 181–185. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.033.

## Введение

Известно, что разработка простых, дешевых и безопасных для окружающей среды тест-средств для оперативного внелабораторного анализа — одно из важнейших направлений развития аналитической химии. Экономически и экологически оправданной стратегией решения этой задачи является нанесение химических реагентов на удобный в использовании носитель. К перспективным средствам можно отнести индикаторные порошки и бумажные тест-полоски. При этом важен поиск новых реагентов, обладающих заданными химико-аналитическими параметрами. Именно они должны обеспечивать требуемые метрологические характеристики анализа и, по возможности, повышать селективность определения. Будучи очень подходящими в качестве таких реагентов, в настоящее время интенсивно исследуются нанокompозитные материалы на основе наночастиц серебра. Стоит отдельно отметить, что НЧ серебра выгодно выделяются среди различных НЧ металлов за счет проявления широкого спектра свойств: выдающейся плазмонной активности, антибактериальной активности, химической стабильности, хорошей тепло- и электропроводности, каталитической активности [1–5].

Ранее нами было описано использование наночастиц серебра в анализе галогенидов [6–13]. В продолжение этих исследований целью нашей работы стала разработка чувствительного метода внелабораторного анализа объектов на содержание иодид-ионов. Для разработанного метода выявлены предел обнаружения (0,01 мг/л) и диапазон определяемых концентраций (0,03–0,3 мг/л) йодидов.

## Результаты исследований



**Рис. 1.** Установка для динамической газовой экстракции:  
1 — резиновая пробка; 2 — тест-полоска; 3 — стеклянный сосуд для анализируемого раствора; 4 — держатель тест-полосок; 5 — реакционная смесь; 6 — стеклянный барботер; 7 — полимерный шланг; 8 — воздушный микрокомпрессор

(8), соединенного со стеклянным барботером (6), впаянным в сосуд, полимерным шлангом (7). Затем к рабочим растворам добавляли растворы сульфата железа (III) и серной кислоты. Для прокачки воздуха через реактивную систему в лабораторных условиях использовали микрокомпрессор Hailea Асо-6601. Полоски извлекали и сканировали с помощью сканера Canon CanoScan LiDE 210 (Canon) на белом фоне с разрешением 300 ppi. Отсканированные изображения обрабатывали в графическом редакторе Adobe Photoshop 7.0 в режиме RGB путем усреднения цветовых координат RGB отдельных пикселей в пределах круглой реактивной зоны.

Принцип предлагаемого подхода к определению йодидов основан на их мягком окислении до йода с помощью Fe (III) и последующем его динамическом извлечении из раствора потоком воздуха

Рабочие растворы веществ готовили растворением их точных навесок или аликвот в дистиллированной воде, полученной с помощью системы очистки воды Millipore Simplicity (Merk Millipore). Стандартные растворы йодидов готовили путем разбавления соответствующих аликвот исходного стандартного раствора (0,01 г/л) непосредственно перед использованием. Раствор йодида калия стандартизировали аргентометрическим титрованием. Массу веществ определяли на аналитических весах 2-го класса ВЛР-20 (Госметр) с погрешностью  $\pm 0,0001$  г.

Рабочие растворы помещали в установку для динамической экстракции газов (рис. 1). Она состояла из стеклянного сосуда для анализируемого раствора (3), закрытого резиновой пробкой (1), внутри которой находился держатель тест-полосок (4) с зажатой тест-полоской (РИБ) (2), воздушного микрокомпрессора

с одновременным детектированием РИБ. Мягкое окисление позволяет превратить йодид-ион в летучий йод. Стоит обратить внимание на то, что Fe (III) не взаимодействует с бромидом и хлоридами, что устраняет их мешающее влияние, существенно заметное в случае таких сильных окислителей, как перманганат калия. Динамическая газовая экстракция позволяет пространственно отделить йод от мешающих ионов и других нелетучих соединений в растворе, тогда как бумага, модифицированная НЧ Ag, обеспечивает его обнаружение. Реакция йода с иммобилизованными НЧ Ag приводит к их окислению и появлению на тест-полоске белого пятна. Уменьшение интенсивности цвета можно отслеживать с помощью обычного сканера посредством измерения цветовых координат RGB, необходимых для построения калибровочной кривой для определения содержания йодидов. Этот принцип схематически представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема определения йодидов на основе динамической газовой экстракции и колориметрического обнаружения на бумаге, модифицированной НЧ серебра

Коэффициенты экспоненциальных уравнений  
цветовых координат

|                | R         | G         | B         |
|----------------|-----------|-----------|-----------|
| y              | 115±2     | 103±2     | 94±2      |
| A              | 90±4      | 81±2      | 72±3      |
| t              | 0,34±0,03 | 0,29±0,02 | 0,17±0,02 |
| A/t            | 265       | 279       | 424       |
| R <sup>2</sup> | 0,9900    | 0,9947    | 0,9917    |

раствора Fe (III) (0,5 моль/л). Горлышко сосуда плотно закрывали пробкой, внутри которой находился держатель тест-полосок с РИБ, модифицированной наночастицами Ag. Включали воздушный микрокомпрессор и барботировали воздух через раствор со скоростью 2,8–3,0 л/мин в течение 20 мин. После этого тест-полоску извлекали и сканировали. Полученное изображение было проанализировано с точки зрения цветовых координат R, G, B. Координата цвета B использовалась для построения калибровочной кривой. Доказано, что зависимость цветовых координат от концентрации йодидов адекватно описывается экспоненциальным уравнением первого порядка:  $y = y_0 + A(1 - e^{-Ct})$ , где y — цветовая координата R, G или B, C — концентрация аналита,  $y_0$ , A и t — параметры регрессии.

Рассчитанные параметры регрессии для калибровочных кривых приведены в таблице.

## Выводы

Разработан чувствительный метод внелабораторного определения йодид-ионов. Подобраны оптимальные условия эксперимента (реагенты, их концентрации, скорость подачи воздушного потока). Определен предел обнаружения (0,01 мг/л) и диапазон определяемых концентраций (0,03–0,3 мг/л) йодидов. Благодаря высокой селективности газовой экстракции этот метод требует лишь минимальной предварительной обработки пробы, что упрощает анализ. Другими преимуществами метода являются эффективность, простота и низкая стоимость.

## Список источников

1. The bactericidal effect of silver nanoparticles / J. R. Morones [et al.] // *Nanotechnology*. 2005. Vol. 16. P. 2346.
2. Silver nanoparticle — *E. coli* colloidal interaction in water and effect on *E. coli* survival / A. Dror-Ehre [et al.] // *J. Colloid Interface Sci.* 2009. Vol. 339. P. 521–526.
3. Antifungal effects of citronella oil against *Aspergillus niger* ATCC 16404 / W. Li [et al.] // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2013. Vol. 7. P. 7483–7492.

4. Sharma V. K., Yngard R. A., Lin Y. Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2009. Vol. 145. P. 83–96.
5. Synthesis of starch-stabilized silver nanoparticles and their application as a surface plasmon resonance-based sensor of hydrogen peroxide P. Vasileva [et al.] // *Colloids Surf., A.* 2011. Vol. 382. P. 203–210.
6. An improved step-by-step airflow/paper-based colorimetric method for highly selective determination of halides in complex matrices / M. O. Gorbunova [et al.] // *Talanta.* 2020. Vol. 219. P. 121254.
7. A dynamic gas extraction-assisted paper-based method for colorimetric determination of bromides / M. O. Gorbunova [et al.] // *Anal. Methods.* 2020. Vol. 12. P. 587–594.
8. Determination of iodide based on dynamic gas extraction and colorimetric detection by paper modified with silver triangular nanoplates / M. O. Gorbunova [et al.] // *Microchem. J.* 2019. Vol. 145. P. 729–736.
9. Gorbunova M. O., Bayan E. M. A novel paper-based sensor for determination of halogens and halides by dynamic gas extraction // *Talanta.* 2019. Vol. 199. P. 513–521.
10. Dynamic gas extraction of iodine in combination with a silver triangular nanoplate-modified paper strip for colorimetric determination of iodine and of iodine-interacting compounds / M. O. Gorbunova [et al.] // *Microchim. Acta.* 2019. Vol. 186. P. 188.
11. Towards highly selective detection using metal nanoparticles: A case of silver triangular nanoplates and chlorine / V. V. Apyari [et al.] // *Talanta.* 2018. Vol. 176. P. 406–411.
12. Selective determination of chloride ions using silver triangular nanoplates and dynamic gas extraction / M. O. Gorbunova [et al.] // *Sens. Actuators B.* 2018. Vol. 256. P. 699–705.
13. Получение реактивных индикаторных бумаг с треугольными нанопластинками серебра для химического анализа / В. В. Апыри [и др.] // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2017. Т. 58, № 4. С. 170–177.

## References

1. Morones J. R., Elechiguerra J. L., Camacho A., Holt, K., Kouri, J. B., Ramírez, J. T., Yacaman M. J. The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 2005, Vol. 16, pp. 2346.
2. Dror-Ehre A., Mamane H., Belenkova T., Markovich G., Adin A. Silver nanoparticle — *E. coli* colloidal interaction in water and effect on *E. coli* survival. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, Vol. 339, pp. 521–526.
3. Li W., Shi Q., Chen Y.B., Ouyang Y.-S., Duan S.-S. Antifungal effects of citronella oil against *Aspergillus niger* ATCC 16404. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, Vol. 97, pp. 7483–7492.
4. Sharma V. K., Yngard R. A., Lin Y. Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, Vol. 145, pp. 83–96.
5. Vasileva P., Donkova B., Karadjova I., Dushkin C. Synthesis of starch-stabilized silver nanoparticles and their application as a surface plasmon resonance-based sensor of hydrogen peroxide. *Colloids and Surfaces A*, 2011, Vol. 382, pp. 203–210.
6. Gorbunova M. O., Apyari V. V., Baulina A. A., Garshina M. S., Kulyaginova M. S., Shevchenko A. V., Furletov A. A., Dmitrienko S. G., Zolotov Y. A. An improved step-by-step airflow/paper-based colorimetric method for highly selective determination of halides in complex matrices. *Talanta*, 2020, Vol. 219, pp. 121254.
7. Gorbunova M. O., Garshina M. S., Kulyaginova M. S., Apyari V. V., Furletov A. A., Garshev A. V., Dmitrienko S. G., Zolotov Y. A. A dynamic gas extraction-assisted paper-based method for colorimetric determination of bromides. *Analytical Methods*, 2020, Vol. 12, pp. 587–594.
8. Gorbunova M. O., Baulina A. A., Kulyaginova M. S., Apyari V. V., Furletov, A. A., Garshev A. V., Dmitrienko S. G. Determination of iodide based on dynamic gas extraction and colorimetric detection by paper modified with silver triangular nanoplates. *Microchemical Journal*, 2019, Vol. 145, pp. 729–736.
9. Gorbunova M. O., Bayan E. M. A novel paper-based sensor for determination of halogens and halides by dynamic gas extraction. *Talanta*, 2019, Vol. 199, pp. 513–521.
10. Gorbunova M. O., Baulina A. A., Kulyaginova M. S., Apyari V. V., Furletov A. A., Volkov P. A., Bochenkov V. E., Starukhin A. S., Dmitrienko S. G. Dynamic gas extraction of iodine in combination with a silver triangular nanoplate-modified paper strip for colorimetric determination of iodine and of iodine-interacting compounds. *Microchimica Acta*, 2019, Vol. 186, pp. 188.
11. Apyari V. V., Gorbunova M. O., Shevchenko A. V., Furletov A. A., Volkov P. A., Garshev A. V., Dmitrienko S. G., Zolotov Y. A. Towards highly selective detection using metal nanoparticles: A case of silver triangular nanoplates and chlorine. *Talanta*, 2018, Vol. 176, pp. 406–411.
12. Gorbunova M. O., Shevchenko A. V., Apyari V. V., Furletov A. A., Volkov P. A., Garshev A. V., Dmitrienko S. G. Selective determination of chloride ions using silver triangular nanoplates and dynamic gas extraction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, Vol. 256, pp. 699–705.

13. Apyari V. V., Furletov A. A., Garshev A. V., Volkov P. A., Gorbunova M., Shevchenko A. V. Preparation of Reagent Indicator Papers with Silver Triangular Nanoplates for Chemical Analysis. Moscow University Chemistry Bulletin, 2017, Vol. 72, pp. 167–173.

***Информация об авторах***

**Т. С. Колесникова** — преподаватель;

**М. О. Горбунова** — кандидат химических наук, доцент;

**И. Е. Уфлянд** — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой.

***Information about the authors***

**T. S. Kolesnikova** — Teacher;

**M. O. Gorbunova** — PhD (Chemistry), Assistant Professor;

**I. E. Uflyand** — Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Head of department.

Статья поступила в редакцию 31.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.  
The article was submitted 31.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.